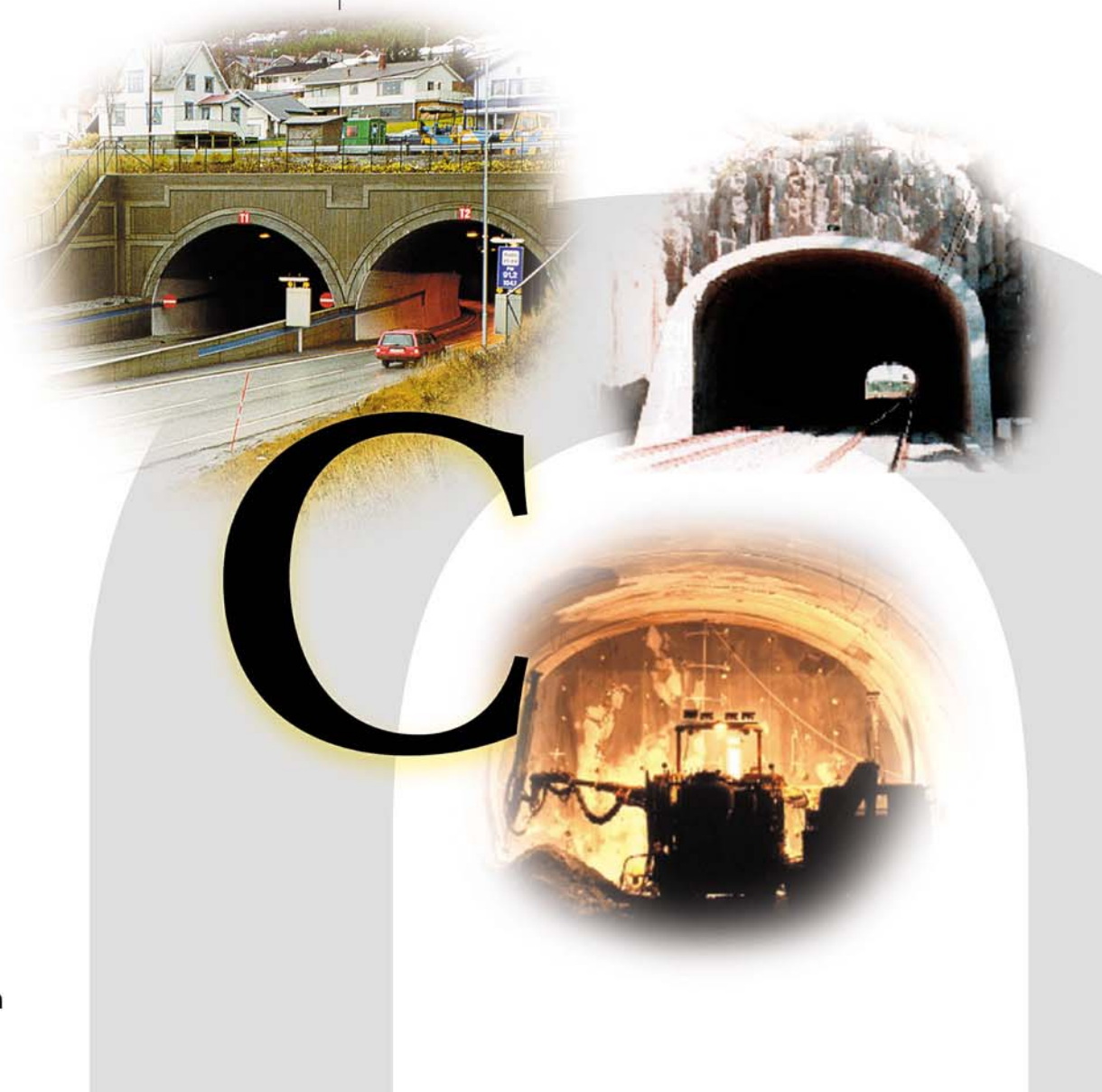


# MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

Rapport nr: **30**

## Vanninfiltrasjon Erfaringer og anbefalinger



Intern rapport nr. 2324



**Statens vegvesen**

# Miljø- og samfunnstjenlige tunneler

## Vanninfiltrasjon – erfaringer og anbefalinger

20001042-4

5 juni 2003

**Oppdragsgiver:** **Prosjektet Miljø- og  
Samfunnstjenlige tunneler**

**Kontaktperson:** Alf Trygve Kveen, Statens  
vegvesen, Vegteknisk kontor

**Kontraktreferanse:**

### **For Norges Geotekniske Institutt**

**Prosjektleder:** Vidar Kveldsvik

**Rapport utarbeidet av:** Anette Wold Magnussen

**Kontrollert av:** V Kveldsvik og Kjell Karlsrud

**Arbeid også utført av:** Vidar Kveldsvik



## Sammendrag

Denne rapporten er utarbeidet som en del av prosjektet ”Miljø- og samfunnstjenlige tunneler”. Formålet med ”Delprosjekt C4 Vanninfiltrasjon” er å etablere et grunnlag for prosjektering, drift og vedlikehold av vanninfiltrasjonsanlegg for å motvirke uønskede konsekvenser av innlekkasje av grunnvann til tunneler eller andre undergrunnsanlegg. Slike konsekvenser kan være i form av redusert poretrykk i nærliggende leirfylte dyprenner og medfølgende setninger og skader på byggverk, eller endring av grunnvannstand som kan påvirke naturmiljø.

Rapporten oppsummerer erfaringer med vanninfiltrasjon for opprettholdelse av poretrykk i marine avsetninger og vanngardiner til ulike formål som å hindre lekkasje av gass og oljeprodukter fra bergrom.

For vanninfiltrasjon for opprettholdelse av poretrykk i marine avsetninger er det gitt en oppsummering og anbefalinger i Kapittel 10. For en leser som er opptatt av nettopp denne problemstillingen anbefales det å lese Kapittel 10 først, deretter kan detaljer og spesielle erfaringer leses andre steder i rapporten.

Den kanskje viktigste anbefalingen når det gjelder vanninfiltrasjon for opprettholdelse av poretrykk i marine avsetninger er:

Metoden anbefales primært anvendt som et midlertidig tiltak i byggefasen. Permanente anlegg bør generelt unngås, og betraktes som nødløsninger.

## Innhold

1	INNLEDNING .....	5
2	HISTORIKK .....	6
3	ULIKE METODER FOR VANNINFILTRASJON .....	6
4	ERFARINGER.....	9
4.1	Generelt.....	9
4.2	Brønner i fjell.....	9
4.3	Brønner i løsmasser .....	10
5	LEVETIDSBETRAKTNINGER / LANGTIDSEFFEKTER .....	11
5.1	Generelt.....	11
5.2	Reduksjon av infiltrasjonskapasitet .....	12
5.3	Erosjon og kjemisk stabilitet .....	12
5.4	Stabilitet i løsmasser .....	12
6	PRAKTISK UTFORMING, DRIFT OG VEDLIKEHOLD.....	13
6.1	Fjellbrønner.....	13
6.1.1	Plassering og utførelse av borehull.....	13
6.1.2	Brønntesting.....	13
6.1.3	Vanntilførsel .....	14
6.1.4	Kontroll av trykk og vanninngang.....	14
6.1.5	Vedlikeholdsrutiner .....	14
6.2	Løsmassebrønner .....	15
6.2.1	Vurder om løsmassebrønner er hensiktsmessig.....	15
6.2.2	Rørbrønner i løsmasser .....	15
6.2.3	Plassering og utførelse av borehull.....	16
6.2.4	Brønntesting.....	16
6.2.5	Kontroll av trykk og vanninngang.....	16
7	OVERVÅKNING .....	17
7.1	Generelt.....	17
7.2	Poretrykksmålinger .....	18
7.3	Setningsmålinger .....	18
7.4	Datapresentasjon.....	19
7.5	Sammenhengen mellom poretrykk, drenering og setninger .....	21
8	ERFARINGER MED VANNINFILTRASJON I OSLO-OMRÅDET.....	22
8.1	Generelt.....	22
8.2	Geologiske forhold .....	23
8.3	Infiltrasjonsbrønner i berg .....	23
8.3.1	T-bane til Ellingsrudåsen - Tokerud skole .....	23
8.3.2	Granfosstunnelen .....	23
8.3.3	VEAS, Valler skole, Bærum.....	24
8.3.4	NSB "Vest", Abelhaugen – Olav Kyrres Plass .....	24
8.3.5	Avløpstunnel Frognerparken – Torshov .....	27

8.3.6	Fjellinjen/Festningstunnelen.....	34
8.3.7	Romeriksporten .....	35
8.3.7.1	Generelt .....	35
8.3.7.2	Godlia .....	36
8.3.7.3	Hellerud .....	39
8.3.7.4	Ellingsrud.....	43
8.3.7.5	Strømmen.....	45
8.3.7.6	Østmarka.....	47
8.3.8	Tåsentunnelen.....	48
8.3.9	Nye Nationalteatret stasjon.....	49
8.3.10	Kostnader.....	57
8.4	Infiltrasjonsbrønner i løsmasser.....	57
9	ERFARINGER MED VANNGARDIN.....	58
9.1	Generelt.....	58
9.2	Luftputekamre.....	60
9.2.1	Kvilldal kraftverk .....	60
9.2.2	Tafjord kraftverk.....	61
9.2.3	Torpa kraftverk .....	61
9.3	LPG- og oljelagere.....	62
9.3.1	Rafnes propanlager .....	62
9.3.2	Mongstad, lager for LPG .....	63
10	OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER AV VANNINFILTRASJON FOR OPPRETTHOLDELSE AV PORETRYKK I MARINE AVSETNINGER .....	65
10.1	Når skal vanninfiltrasjon benyttes? .....	65
10.2	Effekt av vanninfiltrasjon .....	66
10.3	Plassering av borehull i berg.....	67
10.4	Utførelse av borehull i berg.....	68
10.5	Vanntilførsel .....	70
10.6	Testing .....	70
10.7	Vanninngang og trykk .....	70
10.8	Kontroll av trykk, vanninngang og effekt av brønnen.....	71
10.9	Vedlikeholdsrutiner .....	71
10.10	Erosjon.....	71
11	REFERANSER .....	72

### Kontroll- og referanseside

## 1 INNLEDNING

Denne rapporten er utarbeidet som en del av prosjektet ”Miljø- og samfunnstjenlige tunneler”. Formålet med ”Delprosjekt C4 Vanninfiltrasjon” er å etablere et grunnlag for prosjektering, drift og vedlikehold av vanninfiltrasjonsanlegg for å motvirke uønskede konsekvenser av innlekkasje av grunnvann til tunneler eller andre undergrunnsanlegg. Slike konsekvenser kan være i form av redusert poretrykk i nærliggende leirfylte dyprenner og medfølgende setninger og skader på byggverk, eller endring av grunnvannstand som kan påvirke naturmiljø.

Vanninfiltrasjon blir benyttet til ulike formål:

- Opprettholde poretrykk for å hindre setninger i marine avsetninger
- Opprettholde vanntrykket rundt fjellhaller for lagring av olje og LPG og hindre lekkasjer mellom hallene
- Hindre gasslekkasjer fra gass under trykk i lagringshaller i fjell
- Hindre luftlekkasjer fra luftputekamre i vannkraftanlegg
- Sikre tilførsel av vann til grunnvannsforsyning

For å redusere innlekkasje til undergrunnsanlegg kan berget injiseres eller det kan konstrueres en vanntett betongutstøpning. Kunstig infiltrasjon av vann benyttes hovedsakelig som et supplement til dette for å kompensere for grunnvannssenkning under og eventuelt etter anleggsperioden.

For opprettholdelse av grunnvannstand og poretrykk i løsmasser er de fleste brønnene etablert ved at vann tilføres under trykk i borehull i fjell under løsmassene. Brønner i løsmasser har vært forsøkt flere ganger i Norge, men uten særlig suksess.

Vanninfiltrasjon er best egnet som midlertidig tiltak i anleggsfasen, og bør generelt ikke planlegges benyttet som permanent løsning. Vanninfiltrasjon som permanent løsning blir likevel aktuelt dersom tettingstiltak ikke har gitt godt nok resultat med hensyn til konsekvens for poretrykk og setninger eller naturmiljø. Det finnes flere eksempler på dette. Permanent vanninfiltrasjon i form av vanngardin har blitt benyttet en rekke ganger som en planlagt permanent løsning ved lagre i fjell og ved vannkraftverk (luftputekamre).

Prosjektering av infiltrasjonsanlegg krever gode kunnskaper om hydrogeologiske forhold for å bestemme lokalitet, dybde, type filter, infiltrasjonstrykk mm. Dessuten er det svært viktig å opprette en langsiktig plan for drift og vedlikehold, særlig dersom anlegget skal være permanent.

Denne rapporten er ment å gi et grunnlag for prosjektering av vanninfiltrasjonsanlegg. Rapporten sammenstiller praktiske erfaringer fra tidligere anlegg og en del konklusjoner er trukket og anbefalinger er gitt.

Rapporten ”*Permanent infiltrasjon av vann i løsmasseområder. Prinsipper for etablering, driftsovervåkning og vedlikehold*” utarbeidet i forbindelse med



Romeriksporten er benyttet i stor grad. Erfaringsdata er også hentet fra statusrapporter fra ulike prosjekter, samt samtaler med Jørn Grøndal, Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten. Erfaringer fra etablering og drift av vanngardiner er hentet fra ulike artikler. Historikk, erfaringer og levetidsbetraktninger er hentet fra en rapport som ble utarbeidet i forbindelse med vanninfiltrasjon ved Romeriksporten (NGI rapport 971956-1).

## 2 HISTORIKK

Vanninfiltrasjon, eller kunstig tilført vann til grunnen, er benyttet som metode for å opprettholde poretrykk og grunnvannstand, ved flere typer anlegg i Norge og Sverige. Metoden synes i første rekke å være et svensk/ norsk fenomen, men eksempler på bruk finnes også i Nederland og USA (Andersson & Berntson, 1979).

Vanninfiltrasjon ble benyttet i Stockholm så tidlig som i 1957 (Andersson & Berntson, 1979). Hensikten var å hindre skader som følge av grunnvannssenkning. Faren for grunnvannssenkning oppstod ved at man hadde innlekkasje av grunnvann til ulike typer tunneler som ble drevet. Infiltrert vann bidro til å opprettholde poretrykk og grunnvannstand i løsmasser over fjell. I første omgang ble vann infiltrert gjennom brønner direkte i løsmasser. Som en følge av en del problemer med løsmassebrønner har det blitt vanlig med vanninfiltrasjon i brønner i fjell.

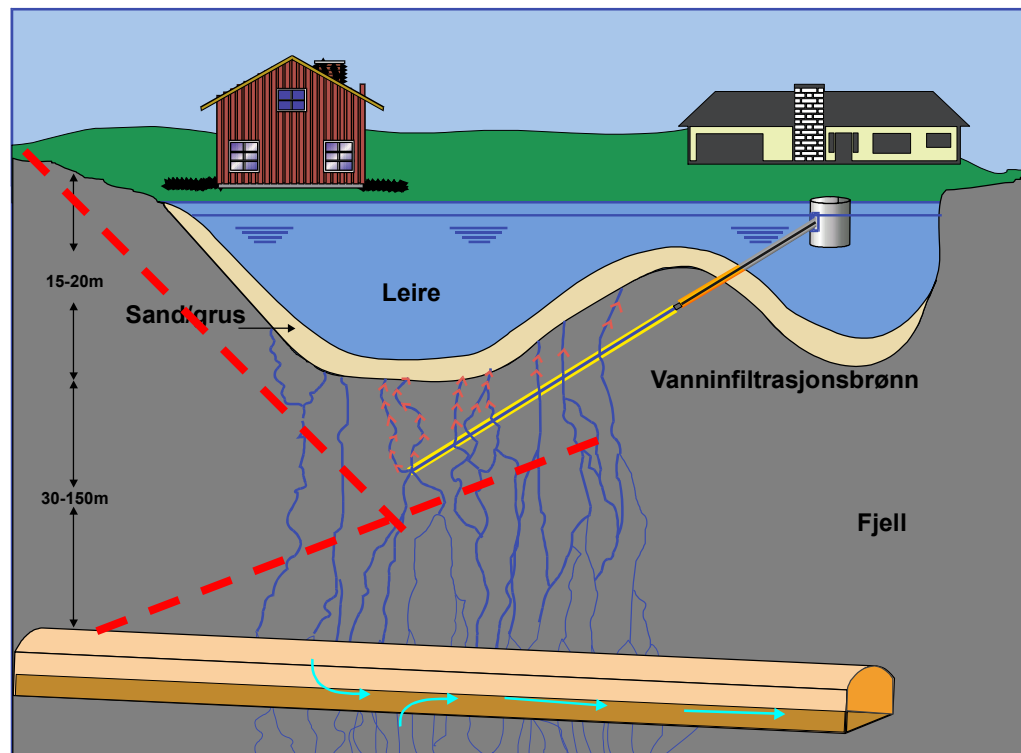
I Norge, hvor metoden etter hvert er velkjent, har man de beste erfaringer med fjellbrønner. I Oslo har man benyttet vanninfiltrasjon ved de fleste tunnelanlegg de siste 20-30 år for opprettholdelse av grunnvannstand og poretrykk i løsmassene, både temporære og permanente anlegg. Første gang det ble infiltrert vann var tidlig i 1960-årene for T-banen ved Tøyen. Vanninfiltrasjon/vanngardin er på 70- og 80-tallet benyttet for å opprettholde poretrykk og grunnvannstand i fjell rundt ulike typer lagre i fjell. Dessuten er vanninfiltrasjon benyttet i forbindelse med luftputekamre i kraftverksanlegg.

## 3 ULIKE METODER FOR VANNINFILTRASJON

Det finnes en rekke ulike metoder for vanninfiltrasjon. Her omhandles kun de tilfeller der vanninfiltrasjon benyttes for å hindre eller begrense skadevirkninger av lekkasje av vann til undergrunnsanlegg. Vann kan infiltreres både i løsmasser og i berg. Et senere kapittel omhandler bruk av vanngardin i forbindelse med lagringshaller i fjell og luftputekamre ved vannkraftverk.

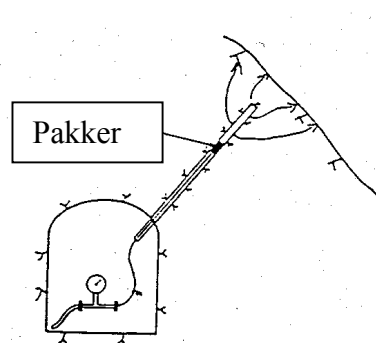
I Norge har man best erfaring med kunstig vanninfiltrasjon fra brønner i fjell, enten fra terreng eller inne fra tunnelen. Brønnene kan bores gjennom løsmasser og ned i fjellet, eller man kan bore injeksjonsbrønnene fra tunnelen/ anlegget som skaper grunnvannssenkningen. Infiltrasjonshull kan også bores fra tunnelen/bergrommet. Borehullene bores fra tunnelen og ut til like under bergoverflaten eller eventuelt ut i friksjonsjordlaget.

Figur 1 viser en typisk situasjon ved infiltrasjon av vann gjennom borehull fra overflaten og ned i berg i forbindelse med en tunnel. Eksempelet er hentet fra Romeriksporten. Forfatteren har lagt inn alternativ plassering av borehull fra terreng og mulig plassering av borehull fra tunnel (røde linjer).



Figur 1 Vanninfiltrasjon gjennom borehull i berg (NSB Gardermobanen AS, 1999, røde linjer lagt inn av forfatteren)

Figur 2 viser en enkel skisse på infiltrasjon fra brønn i fjell boret fra tunnel.

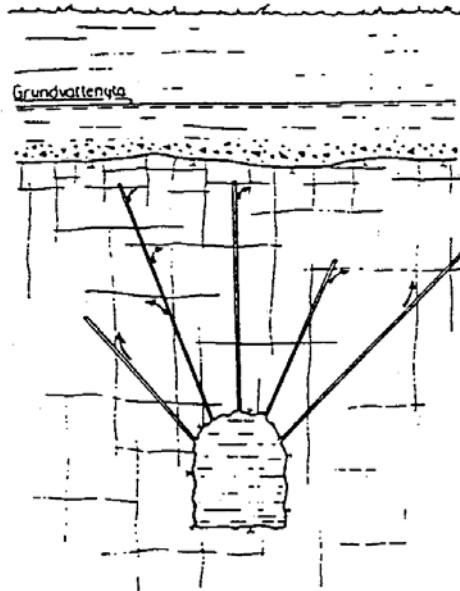


Figur 2 Infiltrasjon gjennom borehull boret fra tunnel (Andersson og Carlsson, 1980)

I noen tilfeller i Sverige har det blitt sprengt ut en separat tunnel som har blitt helt fylt med vann. Vann har så blitt infiltrert fra denne tunnelen gjennom et stort antall infiltrasjonsbrønner. Når tunnelen fylles med vann forsyner den borhullene med



infiltrasjonsvann. På denne måten virker infiltrasjonen over et større område, se Figur 3. Det bores hull ut i berget ut til det oppsprukne dagberget eller ut i friksjonsjordlaget. Systemet står i forbindelse med en påfyllingsbrønn ved overflaten.

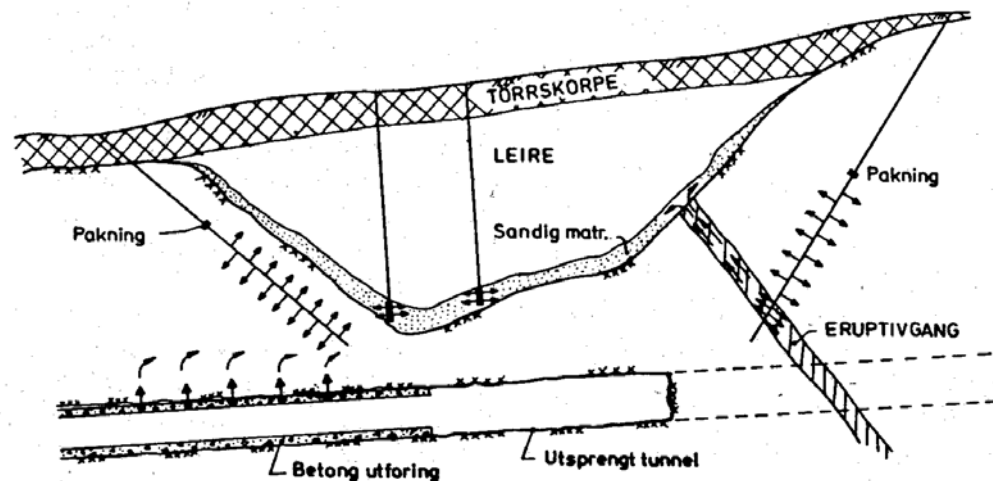


Figur 3 Prinsipp for infiltrasjonstunnel (Morfeldt, 1979)

Erfaringene med kunstig vanninfiltrasjon i løsmasser er dårlige i Norge. Ved infiltrasjon i løsmasser begrenses infiltrasjonstrykket av faren for piping, dvs. vannstrømning opp langs infiltrasjonsbrønnen.

En grundig opplisting av de ulike metoder for vanninfiltrasjon finnes i rapport "Djupinfiltrasjon for grundvattensnivåkontroll" (Olofsson og Palmgren 1994). I rapporten finnes også beskrivelse av ulike prosjekter med erfaringer.

Figur 4 viser eksempler på ulike infiltrasjonsmetoder som ble benyttet ved byggingen av NSB-tunnelen under Oslo Vest på 1970-tallet (Karlsruud 1983).



Figur 4 Eksempler på infiltrasjon i Oslo

I eksempelet fra NSB-tunnelen i Oslo ble det infiltrert vann på flere ulike måter. Først forsøkte man med infiltrasjon gjennom hull boret fra tunnelen, deretter infiltrasjon fra terreng gjennom brønnspisser satt ned ved fjelloverflaten. Det ble brukt lavt overtrykk for å unngå utvasking langs borestrengen, men over tid viste det seg at man ikke lyktes med dette, og utvasking og erosjon rundt brønnspissene gjorde at de ble avstengt. Da man hadde vanskeligheter med å få betongutforingen tett, forsøkte man også å infiltrere vann bak denne. Deretter infiltrerte man vann fra terreng ved å ta sikte på å infiltrere vann i permeable soner i fjellet, spesielt i diabasganger som vist i Figur 4.

## 4 ERFARINGER

### 4.1 Generelt

I forbindelse med tunneler for samferdsel, vannforsyning eller avløp er vanninfiltrasjon benyttet som midlertidig tiltak, og da oftest planlagt på forhånd. I de fleste tilfellene for slike tunneler hvor vanninfiltrasjon har blitt benyttet som permanent løsning har det ikke vært planlagt før byggestart, men blitt ansett nødvendig under eller i etterkant av byggingen for å unngå uønskede konsekvenser for omgivelsene. Bruk av vanninfiltrasjon ved bygging av ulike lagre i berg og ved kraftverksutbygging har oftest vært en del av den planlagte løsningen for anlegget.

Kunnskap om de geologiske og hydrogeologiske forholdene er nødvendig for å kunne bestemme lokalitet, dybde, type filter, infiltrasjonstrykk mm. I hvert tilfelle må det vurderes hvor stort trykk som kan anvendes i forhold til overdekningen. Generelt må det infiltreres mer vann enn det som lekker inn i bergrommet for å hindre uønskede konsekvenser for omgivelsene.

Erfaringen viser at det er viktig med plan for drift, ettersyn og vedlikehold av vanninfiltrasjonsanlegg. Det gjelder særlig dersom anlegget skal være i bruk over lang tid. I forhold til erodering av masser og dermed risiko for skader i omgivelsene, bør man særlig være oppmerksom på forholdet mellom trykk og vanninnngang.

### 4.2 Brønner i fjell

Erfaringene med infiltrasjonsbrønner i fjell er generelt gode både i Norge og utenlands. De mest typiske problemene man har hatt har bestått av gjentetting av vannfiltere som følge av partikkelholdig vann, eller problemer med å oppnå tilfredsstillende kapasitet i etableringsfasen. Kjemisk utfelling og bakterievekst over tid kan også forekomme. For høye vanntrykk har i enkelte tilfeller gitt pakningslekkasjer og vannlekkasjer og utvasking/erosjon opp i terrenget. To eksempler på erosjon og kraterdannelse på overflaten er kjent, på Majorstuen og Ruseløkka, og disse er omtalt i Kapittel 8.3.5 og 8.3.10.

Vanninfiltrasjon i forbindelse med dyprenner i Oslo-området har vært mest vellykket der vanninfiltrasjonshullene er boret relativt dypt og avskjærer eller kommer i kontakt med vannførende soner i fjellet, for eksempel eruptivganger og knusningssoner, som krysser under de aktuelle dyprennene. Det har også vist seg

gunstig å bore ned langs kanten av dyprennene hvor overflatefjellet ofte er mer oppsprukket. Vanninfiltrasjon har vist seg lite effektivt hvis man ikke har oppnådd noen tetting av fjellet rundt tunnelkroppen ved injeksjon og dermed en redusert permeabilitet i bergmassen rundt tunnelen. Det gjelder spesielt for infiltrasjon nær tunnelkroppen hvor man i tilfeller med nær jomfruelig permeabilitet rundt tunnelen ikke oppnår særlig annet enn å øke vannlekkasjen til tunnelen (Karlsruh, 1982, 1987, 1988, 1990).

For permanente vanngardinsystemer rundt fjellhaller og lignende har det i enkelte tilfeller blitt redusert vanntilgang i borehullene over tid. Ellers er driftserfaringene gode.

Vanninfiltrasjon er benyttet i Sverige siden 70-tallet med varierende resultat. Både innlekkingsvann og kommunalt drikkevann har blitt benyttet. Olofsson og Palmgren (1994) har gjort en gjennomgang og sammenstilling av erfaringer gjort i Sverige med infiltrasjonsanlegg for grunnvannskontroll i forbindelse med undergrunnsanlegg. For større undergrunnsanlegg der man kan forvente regelmessig kontroll og ettersyn har infiltrasjon gjennom borehull fra tunnelen til berget eller direkte til jordlagene over berget blitt benyttet. Dette har oftest fungert bra, men i noen tilfeller har det innledningsvis vært problemer med dårlig infiltrasjonskapasitet eller rundgang, dvs. at det infiltrerte vannet kommer tilbake til tunnelen. Infiltrasjonstunneler planlegges og settes i gang før eller samtidig med øvrige undergrunnsanlegg i området. Disse har oftest fungert som planlagt. Systemet er svært driftssikkert, siden det i høy grad er selvrensende (partikler sedimenterer og følger ikke infiltrasjonsvannet inn i berget). Injeksjonstunneler er den dyreste metoden, men har størst effekt over et stort område.

Erfaringer fra Sverige viser at den største driftskostnaden vanligvis er vannkostnadene. Disse kan reduseres ved sirkulasjon av innlekkingsvann, forutsatt at vannets kjemiske og fysiske egenskaper er gunstige og at rensning av vannet kan utføres på anlegget. Dette har derfor utelukkende blitt benyttet der borhullene er boret fra undergrunnsanlegget.

I Sverige har man liten erfaring med brønner i fjell som er boret fra terreng. Hovedproblemet har vært en merkbart redusert infiltrasjonskapasitet med tiden, til tross for at kommunale drikkevannskilder har blitt benyttet. I Norge har man ikke i særlig grad erfart redusert infiltrasjonskapasitet med tiden.

#### 4.3 Brønner i løsmasser

Man har generelt dårlige erfaringer med vanninfiltrasjon direkte i løsmasser, for eksempel direkte i glasifluviale- eller moreneavsetninger mellom leire eller fjell (Karlsruh, 1982). Dette skyldes blant annet at de har vist seg å ta lite vann og at man er sterkt begrenset mht. vanntrykk som kan anvendes på grunn av fare for utvasking opp langs borhullet. I Oslo-området har alle løsmassebrønner blitt avstengt som følge av problemer med dårlig effekt eller utvasking/erosjon og dermed setninger eller direkte kraterdannelse.



I Sverige har det vanligste, enkleste og billigste vært å installere løsmassebrønner fra terrenget. I flere av tilfellene har det imidlertid forekommet piping og gjentetting av brønnene. Slike brønner krever derfor mye tilsyn. Løsmassebrønner er billigst å montere, men kan gi økte driftskostnader og nedsatt funksjon dersom gjentetting oppstår. Redusert infiltrasjonskapasitet har oppstått på et tidlig tidspunkt, og mange anlegg i Sverige som klarte de første års drift på 1970-tallet, var fremdeles i drift i 1994. Kraterdannelse ved brønnene som følge av utvasking av løsmasser har vært observert.

Generelt viser erfaringer fra Sverige at problemene ofte oppstår på et tidlig tidspunkt, og at brønner som overlever de første årene kan fungere tilfredsstillende lenge.

## 5 LEVETIDSBETRAKTNINGER / LANGTIDSEFFEKTER

### 5.1 Generelt

I diskusjonen omkring bruk av vanninfiltrasjon som permanent metode for å opprettholde poretrykk har temaet levetid vært viktig. Goodall og Kjørholt (1989) viser til to prosjekter (LPG-lager i Norge og Sverige) hvor man har observert at vannforbruk i gardin og vanninnstrømning til kammer har avtatt med tiden. For det ene av disse prosjektene (Lindblom, 1989), konkluderes det med at hydrokjemiske prosesser antas å være hovedårsak til den observerte langtids-reduksjon av vannstrømning gjennom gardinen. Forøvrig trekkes ikke noen konklusjoner om årsakssammenheng.

Barbo og Danielsen (1980) beskriver videre ett tilfelle ved et oljelager hvor vanngardinen gikk tett som følge av bakterievekst i og rundt vanngardinen. I artikkelen antydes at bakterievekst skjer i grensesnittet mellom vann og olje, og at man hadde en særlig uheldig situasjon ved at fjellet var gjennomtrukket av olje før vanngardinen ble satt i drift.

Det er foreløpig ikke klart om problemer med bakterievekst og dermed gjentetting, er knyttet til hydrokarbonlagre alene. Det er heller ikke dokumentert at gjentetting av vanngardin utelukkende skyldes bakterievekst, andre effekter som f.eks. mauring (mekanisk eller kjemisk) kan tenkes. For vanninfiltrasjon knyttet til andre typer anlegg enn hydrokarbonlagre er det funnet langtidserfaringer bare fra infiltrasjonsbrønner i Oslo-området og luftputekammere.

Permanente infiltrasjonsbrønner i Oslo-området har vært i drift i flere år, enkelte i ca 20 år. Generelt har brønnene god vanninnngang og fungerer etter hensikten (VAV). Vedlikehold, som skifte av filtre som renses vannet fra ledningsnettet før det injiseres i fjellet, er stedvis nødvendig.

Typiske infiltrasjonsbrønner har diameter i størrelsesorden 2,5 - 4,5" ut fra dimensjon på standard boreutstyr. Brønnene har oftest en effektiv lengde (avstand mellom pakker i fjell og hull-enden) på noe få ti-talls meter. Opptil 96 m er benyttet i forbindelse med Romeriksporten. Generelt infiltreres det med vanntrykk



fra 1 til 5 bar overtrykk, og ved god vanninngang er overtrykk helt ned i 0,5 bar benyttet. Infiltrert vannmengde har variert fra 5 til nesten 100 liter per minutt for brønnene.

Infiltrert vannmengde varierer med infiltrasjonstrykk. Ved konstante infiltrasjonstrykk vil infiltrert vannmengde variere med mottrykk fra grunnvannet slik at mengden av infiltrert vann synes å avta ved høy grunnvannstand/høyt poretrykk. Pga. variasjoner i poretrykk har det enkelte steder vært behov for hyppig justering av infiltrasjonstrykket.

Resultatet av ti års registreringer viser imidlertid ikke noen generell tendens til gjentetting av infiltrasjonsbrønner i fjell i Oslo-området. Erfaringene er også at stopp i lengre perioder lettere kan føre til gjengroing. Det kan derfor være fornuftig å la det gå noe vann, også i perioder hvor man har besluttet at vanninfiltrasjon ikke er nødvendig.

## 5.2 Reduksjon av infiltrasjonskapasitet

Dersom det registreres en reduksjon i infiltrasjonskapasiteten bør man undersøke vannfiltrene i reguleringskummen. Oftest er det gjentetting av filtrene pga. partikler i vannet som er årsak til redusert vanninngang. Skyldes det bakterievekst/slimdannelse på borehullsveggen eller kjemisk utfelling kan høytrykksspyling være effektivt, eventuelt i kombinasjon med et middel som løser opp slimet først. Hullrensing kan også utføres ved syrevasking, som også kan være egnet til rehabilitering ved gjentetting av jernoksid. Sirkulasjon av varmt vann med eller uten kjemikalier kan også gi resultater. Forsiktig splitting av sprekker ved å påføre et høyt infiltrasjonstrykk i et avgrenset intervall, kan også øke infiltrasjonskapasiteten.

## 5.3 Erosjon og kjemisk stabilitet

Løsmasser kan eroderes av infiltrasjonsvannet og transporteres via sprekker ned til fjellanlegget, eller mer sannsynlig til terrenget eller til et permeabelt reservoar. I verste fall kan dette medføre setningsskader og kraterdannelse. Dette kan forekomme dersom vanntrykket i brønnen er mye større enn det som tilsvarer det naturlige grunnvannstrykket på stedet og dermed stor nok vannstrømningshastighet til at erosjon oppstår. I løsmassebrønner kan vann infiltreres gjennom et filter som står i permeable sand-/grusavsetninger nær fjelloverflaten. Vann under overtrykk har strømmet opp langs borehullet på utsiden av foringsrøret, og har erodert fingraderte masser opp langs borehullet. Den samme effekten vil kunne oppstå for fjellbrønner dersom pakkeren står for grunt eller er utett.

## 5.4 Stabilitet i løsmasser

Dersom vanninfiltrasjon fører til økt poretrykk i forhold til den naturlige grunnvannstanden, kan det føre til redusert stabilitet i områder med bløt leire og skrånende terreng eller i områder hvor det skal utføres grave- og fyllingsarbeider. Man har ikke kjente eksempler på at mindre utglidninger eller skred på grunn av

dette, men problemstillingen bør gjennomgås ved infiltrasjon nær skrånende terreng.

## 6 PRAKTISK UTFORMING, DRIFT OG VEDLIKEHOLD

### 6.1 Fjellbrønner

#### 6.1.1 Plassering og utførelse av borehull

Først kartlegges fjelloverflaten med sonderinger og eventuelt seismikk for å velge riktig plassering og vinkel på borehullet. Hullene kan bores med helning ned til ca. 30°. I tillegg til å plassere brønnen et sted der man kan forvente god vanninngang, er det viktig å ha tilstrekkelig avstand til potensielt eroderbare løsmasser.

Før boring i fjell starter må det vanligvis etableres et permanent foringsrør av stål gjennom eventuelle løsmasser. Dette bores ca. 2-5 m ned i fjell. Deretter bores videre med vanlig borkrone i fjell. Det er i dag vanligst å benytte brønnboringststyr for etablering av infiltrasjonsanlegg i fjell. Kronediameter på 90-100 mm er ansett for egnet dimensjon. Borehullsdimensjonen er imidlertid ikke kritisk når det gjelder infiltrert vannmengde.

Nede i borehullet plasseres en pakke for å gjøre det mulig å etablere ønsket vanntrykk i brønnen. Plasseringen av pakken bestemmes ut fra boreloggen. Også ved plassering av pakken er det viktig å tenke på avstanden til potensielt eroderbare løsmasser, spesielt i tilfeller der det er usikkerhet om oppnådd avstand til løsmasser langs ulike deler av borehullet. Det finnes ulike typer pakker på markedet, som mekaniske pakker, ”injeksjonspakker” osv. Enkelte pakker skal støpes inn, men det kan være hensiktsmessig å bruke pakker av en type som kan løsnes og trekkes opp gjennom foringsrøret ved behov for rensing av hullet. Sementmørtel eller annet materiale skal derfor ikke fylles over pakken slik at dette blir umulig.

For et permanent anlegg skal foringsrør, vanntilkopling og reguleringsenhet tilpasses i egnet reguleringskum med kumlokk i terreng/gatenivå.

#### 6.1.2 Brønntesting

For å verifisere om brønnen fungerer etter hensikten må det utføres en testing/utprøving. Dersom det er ønskelig, testes i flere ulike nivåer. Testingens hovedformål er å finne forholdet mellom trykk, vanninngang og respons i poretrykk eller grunnvannstand.

Primært bør man søke å plassere brønnen og pakken slik at man oppnår god nok vanninngang ved bruk av moderat trykk. Dersom testingen viser at man ikke har lykket kan man søke å øke infiltrasjonskapasitet ved å utføre hydraulisk trykking



av brønnen for å åpne eksisterende eller etablere nye sprekker. Det er da viktig å teste på nytt for å kontrollere resultatet.

### 6.1.3 Vanntilførsel

Vanligvis tas vannet fra ledningsnettet for drikkevann, for i best mulig grad å sikre god vannkvalitet, og for å unngå driftsstopp som følge av manglende tilførsel. Det må sørges for at ledningsfremføringer til reguleringskummene merkes av på kommunens ledningskartverk. Installasjonene skal legges frostfritt eller sikres mot frost på annen måte. Drenasje skal være knyttet til alle kummer slik at det ikke blir stående vann i dem.

Ellers er det fornuftig å sikre kummene mot hærverk

Ved infiltrasjon gjennom brønner boret fra undergrunnsanlegget, kan det være aktuelt å benytte lekkasjevannet fra tunnelen. Det bør da holdes oppsyn med vannkvaliteten, da dårlig vannkvalitet kan føre til tilstopping. Et sedimentasjonsbasseng og filter er helt nødvendig i slike tilfeller.

Vannet kan også tilføres via borehull som står i direkte forbindelse med trykksatte vanttunneler.

For å unngå gjentetting av infiltrasjonsbrønnen er det viktig med kontroll av vannkvalitet og utskifting av filtre når det er nødvendig. Det er viktig å undersøke om det er behov for spesialfilter (membranfilter).

### 6.1.4 Kontroll av trykk og vanninngang

Kontroll av trykk og vanninngang oppnås ved trykkmåler, reguleringsventil og vannmåler nedgravd i kum. Dersom det er flere brønner bør reguleringen av vanntilførsel plasseres i samme kum hvis dette er mulig.

Avlesning kan skje manuelt eller automatisk, avhengig av hvor mye reguleringsteknikk og fjernstyring det legges opp til.

Reguleringsanordningen styrer trykk og vannmengder. Regulering kan utføres manuelt eller det kan legges opp til automatisk registrering og fjernavlesning av vannmengder og trykk.

### 6.1.5 Vedlikeholdsrutiner

Det bør utarbeides vedlikeholdsrutiner for er infiltrasjonsanlegg. Disse bør inkludere jevnlig feltkontroller med manuell kontroll av registrerte data, og en generell kontroll av at alle deler av systemet er i operativ stand og om utbedring og måleteknisk kalibrering er nødvendig.

## 6.2 Løsmassebrønner

### 6.2.1 Vurder om løsmassebrønner er hensiktsmessig

Som nevnt tidligere har man i Oslo-området stengt alle løsmassebrønner pga. dårlig effekt og/eller problemer med utvasking/erosjon. Man bør derfor nøye vurdere om det er verdt å forsøke med løsmassebrønner, og heller søke løsninger i form av fjellbrønner.

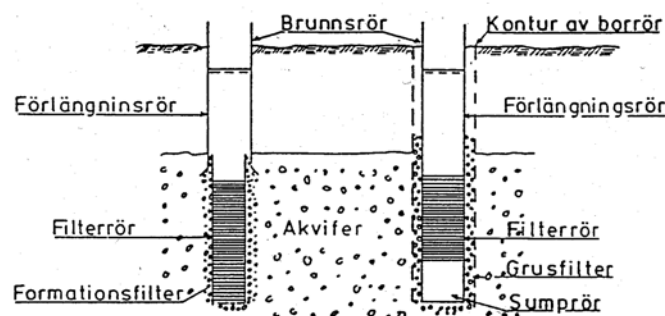
### 6.2.2 Rørbrønner i løsmasser

Brønner i løsmasse drives oftest fra terreng og ned i et friksjonsjordlag, som vanligvis ligger under leire.

I hovedsak består infiltrasjonsbrønner i løsmasser av et brønnrør og et filter. Brønnrøret kan deles inn i tre deler:

- i. Filterrør
- ii. Forlengningsrør opp til terreng
- iii. Et eventuelt sumprør under filterrøret

Brønnfilteret består av et slisset/perforert filterrør og filterfylling. Den mulige infiltrasjonsmengden avhenger av friksjonsjordens evne til å slippe gjennom vann og infiltrasjonstrykk.



Figur 5 Ulike typer rørbrønner (Andersson og Carlsson, 1980)

Filterrøret kan omgis av en filterfylling som formidler jordtrykket mellom akviferen og filterrøret, samt øker akviferens vanntransporterende egenskaper nærmest brønnen. Filterfyllingen hindrer også materiale utenfra å trenge inn i brønnen. Et formasjonsfilter oppnås ved å pumpe finere partikler fra formasjonen inn i brønnen for å danne en sone med høyere permeabilitet nærmest filterrøret. Ved bruk av grusfilter plasseres et materiale med høy permeabilitet nærmest røret, og en trenger ikke pumpe bort finere materiale (Olofsson og Palmgren, 1994).





### 6.2.3 Plassering og utførelse av borehull

I Norge finnes lite referansemateriale om utføring av infiltrasjonsbrønner i løsmasser med formål å opprettholde poretrykket. Det er derfor vanlig å bruke samme prinsipp som for vanlige grunnvannsbrønner. Det vanligste er å infiltrere i morene- eller gruslag over fjell. Her bores foringsrør ned til fjell, og settes ned et filterrør i bunnen. Deretter trekkes foringsrøret opp. Foringsrøret støpes igjen for å tette for vann, eller det kan brukes mekanisk pakker. Velgradert sand eller grus kan benyttes i bunnen.

Det bør velges en brønndiameter på minst 100 mm. Dette for å tillate enkel bruk av utstyr for vedlikehold, rensing av brønnen osv. Dersom det skal installeres permanente pumper for enkel og hyppig rensing, må brønndiameteren dimensjoneres i forhold til dette.

For å hindre uønsket strømning av vann opp langs brønnen som kan medføre erosjon og utvasking av løsmasser, må det tettes og sikres langs foringsrøret. Et mulig oppfyllingsmiddel for å tette langs røret kan være en tilpasset bentonitt-sement-slurry.

### 6.2.4 Brønntesting

For å verifisere om brønnen fungerer etter hensikten må det utføres en testing/utprøving. Testingens hovedformål er å finne forholdet mellom trykk, vanninnngang og respons i poretrykk eller grunnvannstand

Partikulær gjentetting har vist seg å være et problem ved infiltrasjonsbrønner. Det må derfor gjøres en riktig og nøyaktig brønntutvikling, slik at mindre partikler fjernes fra formasjonen utenfor brønnen og et best mulig naturlig filter oppnås.

### 6.2.5 Kontroll av trykk og vanninnngang

Kontroll av trykk og vanninnngang oppnås ved trykkmåler, reguleringsventil og vannmåler nedgravd i kum. Dersom det er flere brønner bør reguleringen av vanntilførsel plasseres i samme kum hvis dette er mulig.

Avlesning kan skje manuelt eller automatisk, avhengig av hvor mye reguleringsteknikk og fjernstyring det legges opp til.

Reguleringsanordningen styrer trykk og vannmengder. Regulering kan utføres manuelt eller det kan legges opp til automatisk registrering og fjernavlesning av vannmengder og trykk.

Infiltrasjonsvannet ledes ned i rør innvendig i brønnen til et nivå godt under hvilende grunnvannsnivå for å unngå innblanding av luft i vannet. Tilførselsrøret utstyres med tilbakeslagsventil.

Det anbefales at maksimalt trykk ikke overstiger 0,2 ganger høyden fra toppen av brønnfilteret og til terrengoverflaten (Andersson 1988). Det bør derfor etableres en trykkmåler på selve brønnhodet.

Brønnen skal være utstyrt med sikkerhetsventil for å sikre mot ødeleggelse ved for høyt vanntrykk. Videre bør brønntoppen påmonteres en luftekran for evakuering av luft innvendig i brønnen.

## 7 OVERVÅKNING

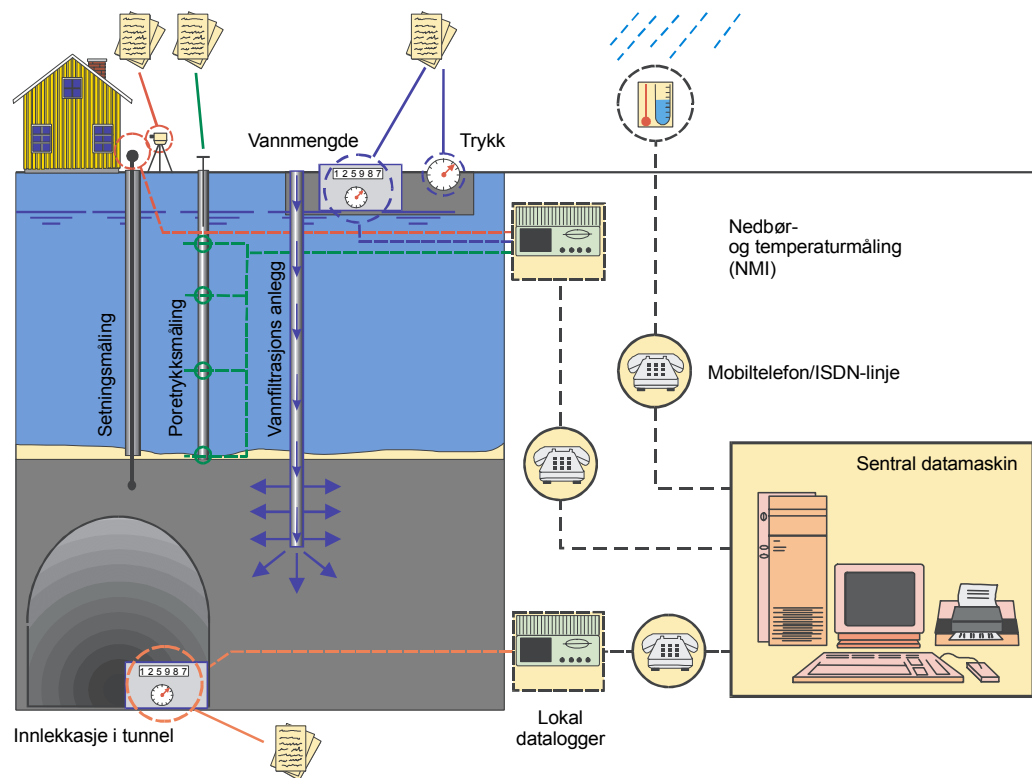
### 7.1 Generelt

Jevnlig ettersyn og vedlikehold av brønner er en forutsetning for gode resultater ved vanninfiltrasjon. Det må samtidig utføres regelmessige målinger av poretrykk og setninger, og kontrollmålinger av infiltrert vannmengde og trykk. Poretrykk og setninger vil avhenge av infiltrerte vannmengder og poretrykk. Ved permanente anlegg er det spesielt viktig med et effektivt og oversiktlig system for registrering, lagring og presentasjon av dataene. Data om innlekkasjeforhold i bergrommet/tunnelen, samt nedbør- og temperaturforhold bør også registreres.

Et infiltrasjons- og overvåkningsanlegg omfatter brønner, poretrykksmålere, eventuelt andre typer målere (setningsmålere), og eventuelt en sentral dataenhet for håndtering og presentasjon av innsamlede data. Data kan også samles inn manuelt. Sammen med poretrykksutviklingen i området er det viktig å gjøre nivåelementer på bygninger for å følge med i setningsutviklingen.

Som en del av overvåkingen, og for å få en best mulig dokumentasjon av vanninfiltrasjonens virkning, bør brønnen(e) stenges av i korte perioder. I denne perioden registreres så hyppig hvordan poretrykket eller grunnvannstanden endres og videre endring når brønnen(e) startes opp igjen.

Figur 6 illustrerer viser et eksempel på prinsipp for vanninfiltrasjonssystem og driftsovervåkningssystem.



Figur 6 Vanninfiltrasjonssystem og driftovervåkningssystem (NSB Gardermobanen AS, 1999)

Hver brønn har egen reguleringsanordning som styrer infiltrert vannmengde og vanntrykk. Registrering og avlesning kan gjøres manuelt eller automatisk.

## 7.2 Poretrykksmålinger

Ved drift av et infiltrasjonsanlegg vil det være viktig å fange opp endringer i poretrykk i relativt permeable lag rett over fjelloverflaten på et tidlig tidspunkt. Fortrinnsvis bør derfor poretrykkene måles nær fjelloverflaten. Hensikten med poretrykksovervåkingen er å:

- Overvåke at poretrykket holdes innenfor visse grenser for å unngå setninger
- Kontrollere effekten av de etablerte brønnene og gi grunnlag for å tolke variasjonene

Avlesningshyppighet og eventuell fjernavlesning avhenger av den primære funksjonen til den enkelte poretrykksmåleren.

## 7.3 Setningsmålinger

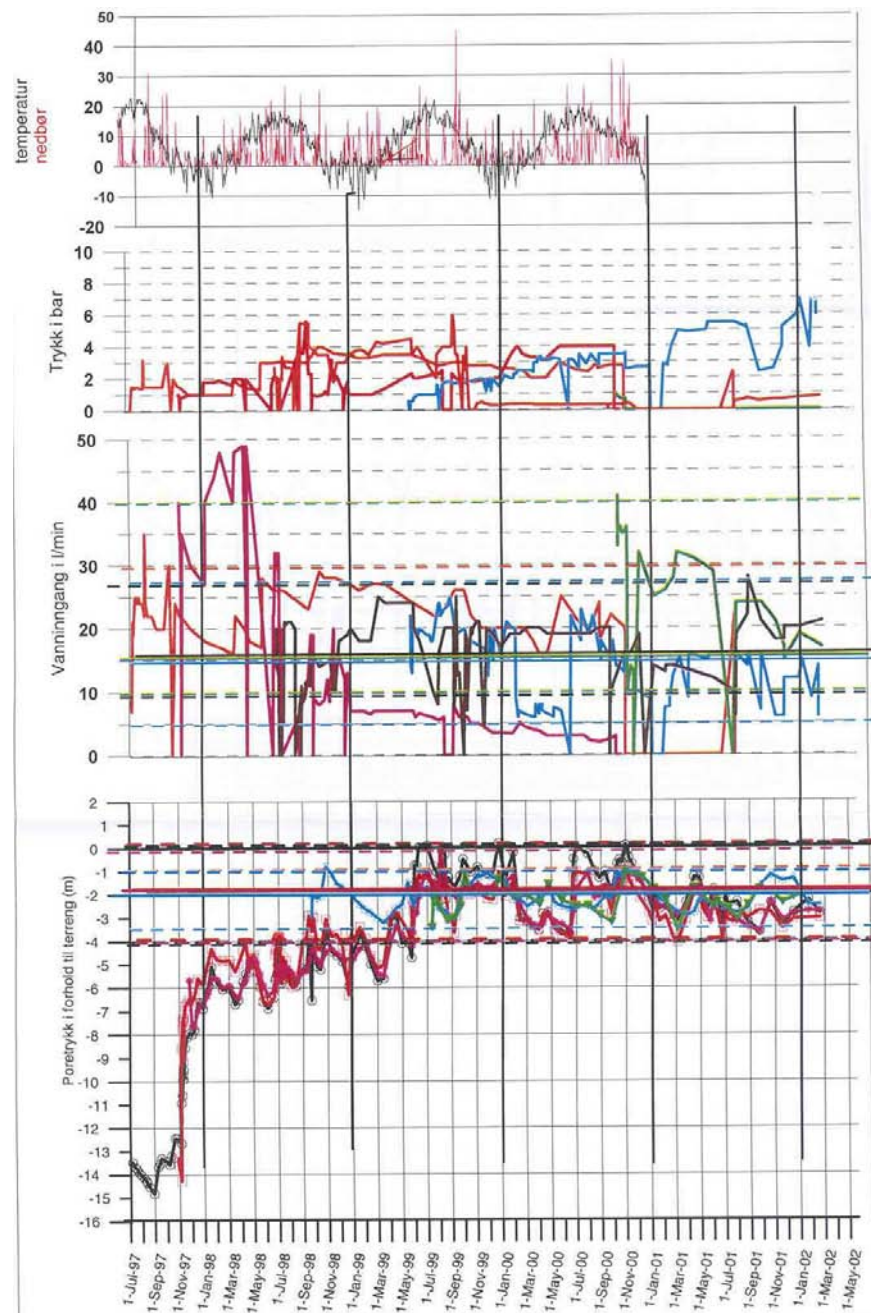
Når det gjelder setningsmålinger bør det defineres et spesifikt program for avlesningsintervaller. Trolig er det mest økonomisk å utføre målingene manuelt, men automatisk overvåking kan gjøres ved å etablere presisjonssetningsmålere.

## 7.4 Datapresentasjon

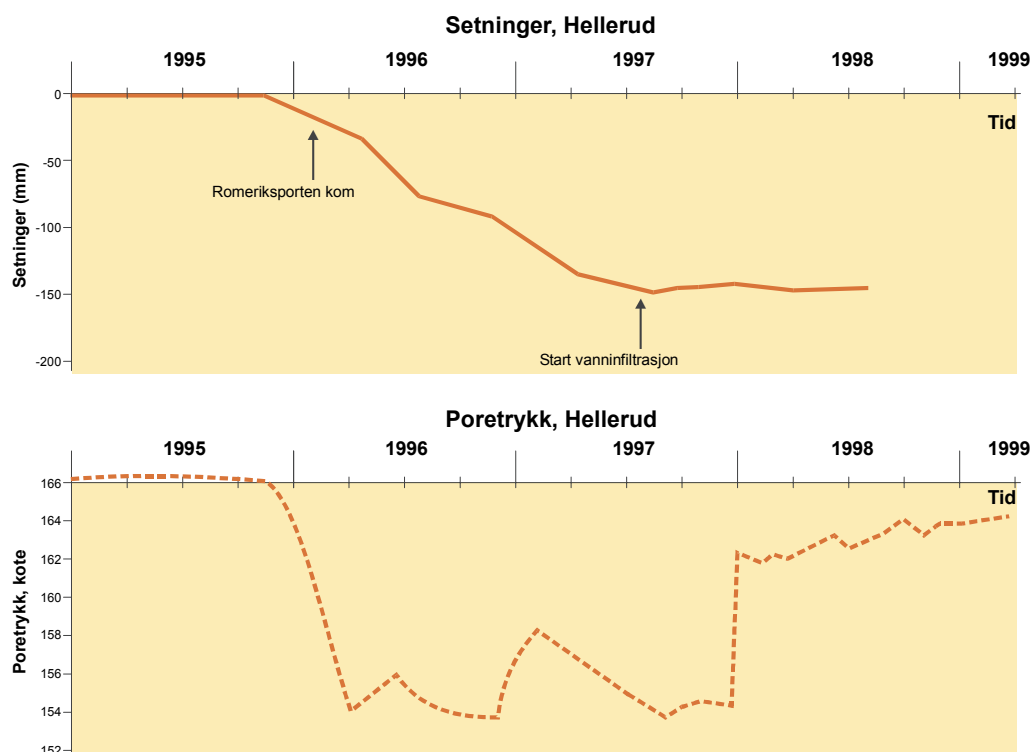
For å få en oversikt over de innsamlede dataene og for lettere å kunne tolke utviklingen, er det nyttig å lage:

1. Tabeller med parametere som funksjon av tid.
2. Grafiske kurver av parametere som funksjon av tid. Kurvene bør vise stighøyde i forhold til terreng (poretrykk), vanninngang i l/min, trykk i bar, og eventuelt værdata. Det kan også være aktuelt å presentere setningsmålingene.
3. Diagrammer med parametere som funksjon av annen parameter; for eksempel kan kurver med forholdet mellom infiltrert vannmengde og vanntrykk kan være nyttig for å få en indikasjon på at ettersyn og vedlikehold kan være nødvendig.

Figur 7 og Figur 8 viser eksempler på presentasjon av innsamlede data.



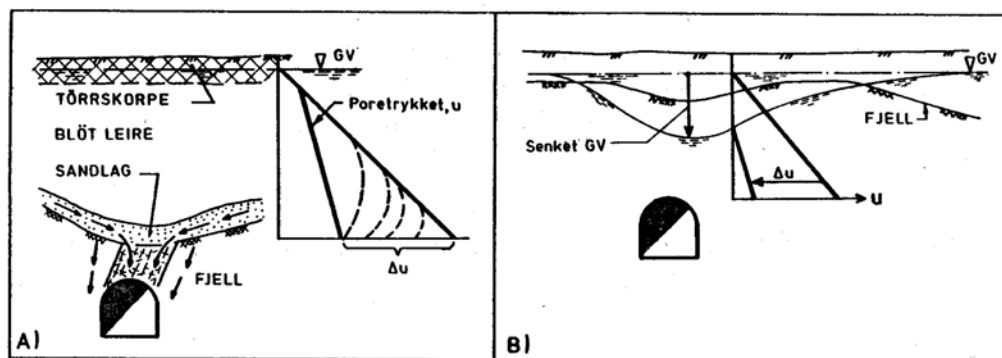
Figur 7 Eksempel på presentasjon av innsamlede data.



Figur 8 Typisk dataregistrering for setninger og poretrykk

### 7.5 Sammenhengen mellom poretrykk, drenasje og setninger

Begrunnelsen for alle eksisterende vanninfiltrasjonsbrønner i Oslo-området med unntak for Puttjern-anlegget i Romeriksporten, er å opprettholde poretrykket for å unngå setningskader på bebyggelse. Hvordan lekkasje til et undergrunnsanlegg påvirker poretrykk eller grunnvannstand er illustrert i Figur 9.



Figur 9 Påvirkning av poretrykk ved lekkasje inn i tunnelanlegg

Figur 9 viser skissemessig hvordan poretrykket kan bli påvirket ved lekkasje av grunnvann inn i et tunnelanlegg. Figur 9A) viser hvordan poretrykket i løsmasser kan bli påvirket over tid og hvor grunnvannstanden ofte ikke blir påvirket, mens Figur 9B) viser en senket grunnvannstand til under fjelloverflaten.

Den interesserte leser kan velge i en rekke publikasjoner om dette temaet, blant annet *Miljø- og Samfunnstjenlige tunneler. Rapport nr. 14. Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø. Statusrapport 2001.*

## 8 ERFARINGER MED VANNINFILTRASJON I OSLO-OMRÅDET

### 8.1 Generelt

Vanninfiltrasjon har vært benyttet for å søke å opprettholde poretrykk og grunnvannstand i forbindelse med de fleste tunnelanlegg i Oslo-området fra ca. 1976 og fram til i dag. Ved bygging av den første fjelltunnelen for undergrunnsbanen i Oslo i 1912-14, Holmenkollbanen, fikk man erfare at lekkasjer inn i tunnelen førte til betydelige poretrykksendringer i ovenfor- og omkringliggende dyprenner i fjellet. Etter dette ble det derfor lagt stor vekt på å tette tunnelene dels ved injeksjon og dels ved betongutføring. I mange tilfeller har resultatet likevel ikke blitt godt nok, og kunstig infiltrasjon av vann har derfor vært benyttet i et forsøk på å opprettholde grunnvannsbalansen og redusere skadelige virkninger av lekkasjene.

I Oslo-området er problemene med lekkasje inn i tunneler knyttet til uønsket drenering av leirfylte dyprenner. Reduksjon i poretrykk og senket grunnvannstand har ført til ulike typer bygningsskader. Skader oppstår som følge av setninger i leire, opptil 40 cm setning er registrert. Videre oppstår skader ved at senket grunnvannstand blottlegger fundamenter/fundamentdeler av tre (flåter, peler). En del oppmerksomhet har dessuten vært viet tilfeller hvor grunnvannstand senkes i områder med alunskifer og hvor man da har forventet fare for svelling.

Erfaringer fra Oslo-området viser at kunstig infiltrasjon av vann ofte fungerer godt. Metoden virker best når vann infiltreres gjennom hull boret relativt dypt for å avskjære og få kontakt med de antatt mest vannførende soner i fjell, som går innunder de leirfylte dyprennene. Dette har typisk vært intrusivganger og spesielle bruddsoner. Infiltrasjon i mer grovkornige løsmasser i overgang mellom leire og fjell har man generelt dårlige erfaringer med. Vanninfiltrasjon har vist seg lite effektivt hvis man ikke har oppnådd noen tetting av fjellet rundt tunnelkroppen ved injeksjon og dermed en redusert permeabilitet i bergmassen rundt tunnelen. Det gjelder spesielt for infiltrasjon nær tunnelkroppen hvor man i tilfeller med nær jomfruelig permeabilitet rundt tunnelen ikke oppnår særlig annet enn å øke vannlekkasjen til tunnelen. (Karlsrud, 1982, 1987, 1988, 1990)

Metoden har primært vært benyttet som et temporært virkemiddel. Det finnes imidlertid flere eksempler på permanente anlegg. Disse er etablert i forbindelse med VEAS' og OVAs kloakktunneler samt E18 – Oslotunnelen/Fjellinjen/Festningstunnelen, Tåsentunnelen, Granfosslinjen og Romeriksporten, med sistnevnte som det desidert størst anlegget. For ingen av disse anleggene var vanninfiltrasjon planlagt som permanent løsning før tunneldrivingen startet.





Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten, foretar ettersyn og drift og vedlikehold for de permanente vanninfiltrasjonsanleggene som er i drift i Oslo i dag. I tillegg har Vestfjordens Avløpsselskap, VEAS, ansvar for to permanente brønner i Bærum kommune. Driftserfaringene er i hovedsak gode, og alle anleggene fungerer tilfredsstillende. For alle brønnene gjelder det at jevnlig ettersyn og vedlikehold er nødvendig. Det foretas jevnlig manuell overvåkning av poretrykk og ettersyn i felt, og filterrens og utskifting av disse er en viktig del av vedlikeholdet. Fra tid til annen kan det også være nødvendig med rengjøring av brønnene med høytrykkspyling.

Det vil kan imidlertid være en viss usikkerhet forbundet med permanent drift av infiltrasjonsanlegg da uforutsette ting kan skje. To eksempel her er brønner på henholdsvis Majorstuen og Ruseløkka hvor erosjon førte til kraterdannelse under kjellere, og disse hendelsene er beskrevet i Kapittel 8.3.5 og 8.3.10. Spesielt hendelsen på Majorstuen var dramatisk.

I det etterfølgende gjennomgås erfaringer fra ulike infiltrasjonsanlegg i Oslo-området, både temporære og permanente.

## 8.2 Geologiske forhold

Berget i Oslo-området består av sedimentære bergarter, for det meste leirstein, leirskifer, knollekalk og kalkstein. I østre del av Oslo sentrum er det også alunskifer. Bergartene er foldet med strøk omtrent NØ-SV. Det finnes en del bruddsoner og forkastninger. Eruptivganger har for det meste strøk i nordlig retning. Uteroderte dyprenner er fylt med marine leiravsetninger, som kan være kvikke. Et grovkornig, trolig glasifluvialt, materiale med tykkelse ca 0-5m ligger ofte i overgangen til fjell.

## 8.3 Infiltrasjonsbrønner i berg

### 8.3.1 T-bane til Ellingsrudåsen - Tokerud skole

Ved Tokerud skole ble det boret og igangsatt en vanninfiltrasjonsbrønn i 1982. Brønnen har infiltrert 3-12 l/min med et infiltrasjonstrykk på 1,8 bar. Brønnen er etablert fra terreng. Anlegget har hatt tilfredsstillende funksjon bortsett fra stopp i 1989 og 1990 pga. tilstopping av filtre. Brønnen etterses 2 ganger i året. Effekten av brønnene er at poretrykket har økt, men ikke til opp til opprinnelig nivå.

### 8.3.2 Granfosstunnelen

Granfosstunnelen ble drevet på slutten av 80-tallet. Ved Lysaker krysser tunnelen under en dyprenne med løsmassetykkelse på minst 15m. Før driving av tunnelen ble det gjort en del forundersøkelser og boret tre infiltrasjonsbrønner fra dagen. Disse brønnene var i drift ca. 1,5 år, og denne midlertidige løsningen førte til at poretrykkene ble noenlunde opprettholdt. I et område vest for tunnelen ble det registrert noe setninger. Det er også en del poretrykksmålere i området som det er målt på siden før tunnelen passerte. I dag leses de av ca. 5 ganger i året.



I ettertid (1991/92) ble det boret tre brønner fra tunnelen. En av dem ble boret i driftsfasen og stengt av da den kom i veien for driften av tunnelen. En ny permanent brønn ble boret i sydgående/vestgående løp da tunnelen var ferdig. Brønnen har infiltrert opp til 25 l/min, men infiltrerer i dag ca 15 l/min. Infiltrasjonstrykket er ca 5 bar. En brønn ble oppgitt innledningsvis pga. driftsproblemer.

I 1997/98 ble pakkeren dratt ut og et rør skiftet ut pga. korrosjon. Driftserfaringene fra brønnen er tilfredsstillende, og den har fungert etter sin hensikt. Jevnlig filterrens er nødvendig. Brønnen etterses hver 14. dag, i perioder ikke så ofte. Effekten av brønnen er at poretrykket er løftet omtrent opp til opprinnelig nivå.

### 8.3.3 VEAS, Valler skole, Bærum

I forbindelse med driving av VEAS-tunnelen ble det boret og igangsatt to infiltrasjonsbrønner i 1977. Brønnene er etablert fra et tverrslag og har infiltrert 2-3 l/min per brønn.

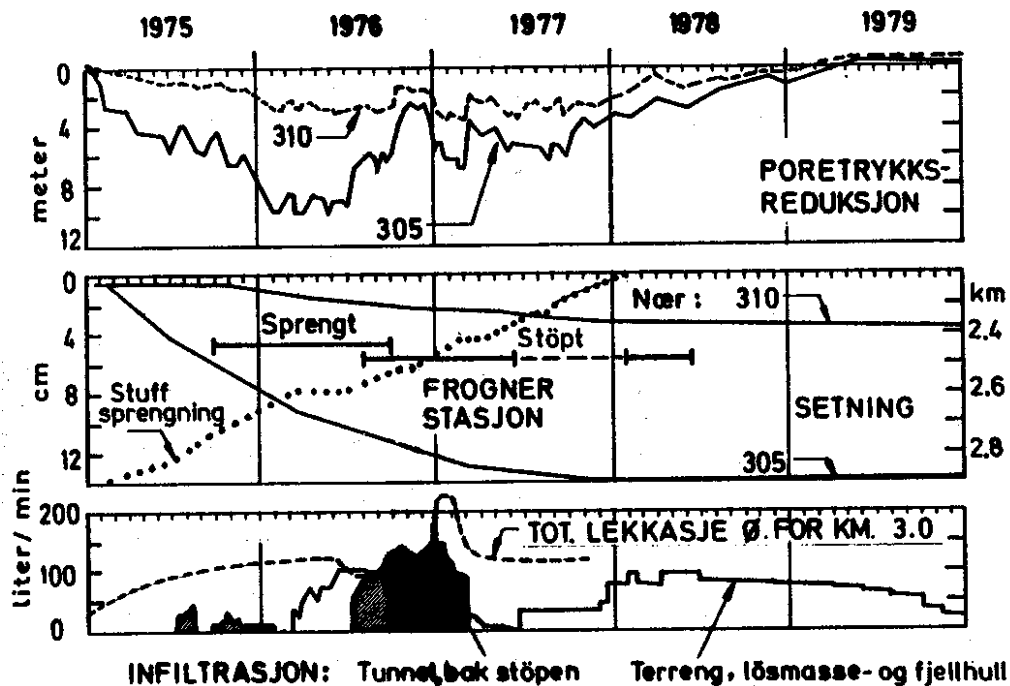
Driftserfaringene er generelt gode. Brønnene har bidratt til å opprettholde poretrykkene i dyprennen ved Valler skole på tilnærmet opprinnelig nivå. Brønnene har med et lengre avbrudd vært i drift siden 1977. I 1997 ble den ene brønnen tett. Det har vært gjort tiltak for å få satt denne i drift igjen, men det er ikke bragt på det rene om denne er i drift i dag.

### 8.3.4 NSB ”Vest”, Abelhaugen – Olav Kyrres Plass

Arbeidet med denne delen av NSB-tunnelen startet i 1973 og ble avsluttet i 1980. Tunnelprofilet varierer i omkrets fra ca. 40 til 50 m, og sålen ligger fra 20 til vel 40 m under grunnvannstand. Forinjeksjon av tunnelen ga et langt fra tilfredsstillende resultat. Selv ikke ganske store markerte lekkasjer lyktes man å tette eller treffe ved forinjeksjon. Store lekkasjer var oftest knyttet til eruptivganger, knusningssoner og forkastninger som krysset tunnelen, og på delvis utvaskede kalkspatfylte slepper. Kunstig infiltrasjon av vann fra dagen og ned i vannførende soner i fjell som skar inn under dyprennen bidro i vesentlig grad til å redusere de skadelige konsekvensene av lekkasjene. Etter at omfattende ettertetting av betongutføringen var ferdig, ble all vanninfiltrasjonen koblet ut, og poretrykkene etablerte seg på sitt opprinnelige nivå. Den ferdige tunnelen var gjennomgående meget tett. I dyprennene ved Parkveien/Inkognitogata ble det registrert en poretrykksreduksjon på opp til 12 m nærmest tunnelen.

I det etterfølgende kommenteres erfaringer med vanninjeksjon, både fra tunnel og fra terreng, fra tre dyprenner som beskrevet i Karlsrud 1983:

Dyprenne I Frogner:

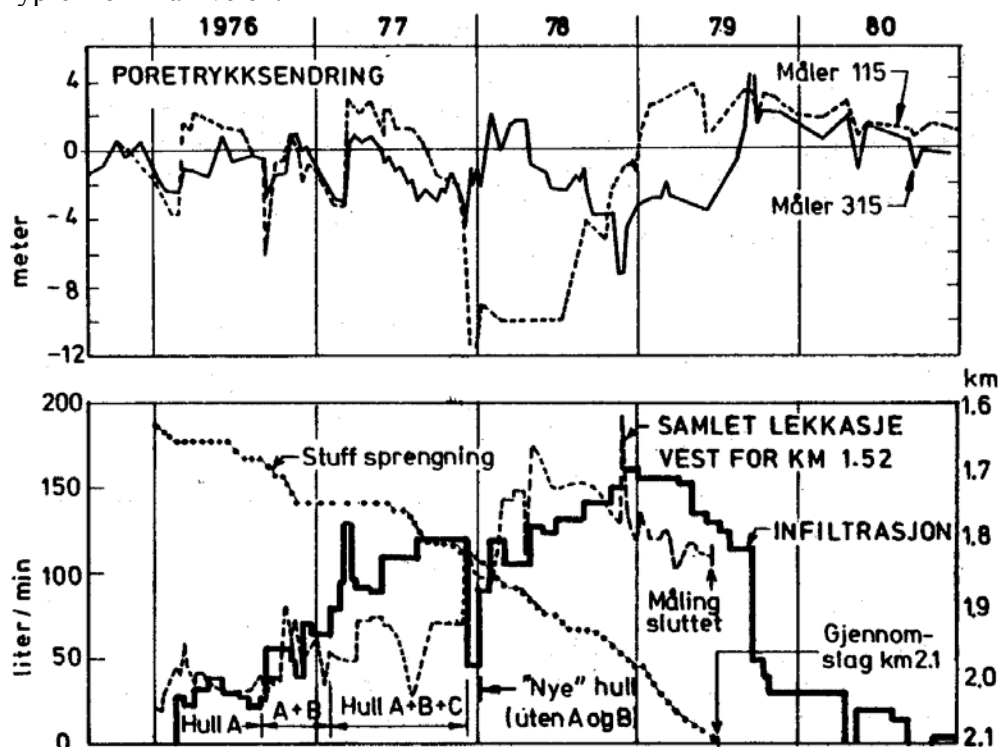


Figur 10 Poretrykksreduksjon, setninger og infiltrasjon (Karlsruud, 1983)

Figur 10 viser poretrykksreduksjon, setninger og infiltrasjon over tid.

Dyprenna er opptil 20 m dyp og dekker ca. 300x60m<sup>2</sup>. Poretrykket sank da stoffen var ca. 100m unna, og ikke vellykket injeksjon førte til at man juli 1975 startet med vanninfiltrasjon gjennom hull boret fra tunnelen. 40 l/min førte til temporært økte poretrykk, men infiltrasjonen ble avstengt da poretrykkene igjen sank. 10-20 l/min ble innfiltrert september til februar 1975/76 var ikke nok til å hindre videre poretrykksreduksjon, og man gikk derfor over til infiltrasjon fra terreng gjennom brønnspisser satt ned ved fjelloverflaten. For å unngå utvasking langs borstrengen ble det brukt lavt overtrykk (5-7m). Totalt ble det infiltrert 80 l/min (7-8 l/min på hver), noe som stoppet poretrykksreduksjonen. Etter et halvt år viste det seg at det var utvasking og erosjon rundt flere av brønnspissene, trykket ble redusert, og etter hvert ble alle avstengt i april 1977. Vanskeligheter med å få støpen tett førte til at man boret gjennom betongen og infiltrerte vann i hulrommet mellom betongen og fjellet. Det ble infiltrert opp til 120-140 l/min med trykk 3-4 bar, og poretrykkene steg halvveis mot normalnivået. Etter hvert førte store lekkasjer til at en utførte kontaktstøp, og denne infiltrasjonene ble avsluttet. Man forsøkte igjen å infiltrerte fra terreng, men nå ved å ta sikte på å infiltrere vann i permeable soner i fjellet, spesielt i diabasganger som krysset tunnelen og gikk inn under dyprennene. Fem hull opptil 60 m lange ble boret med kjerneborutstyr, og fire av dem traff meget vannførende soner. Her ble det infiltrert 120 l/min med trykk 1,5 bar, noe som raskt førte til stigende poretrykk på tross av betydelige lekkasjer i tunnelen. Etter ettertetting kunne infiltrerasjonen reduseres uten innvirkning på poretrykket. Setninger opp til 20 cm ble registrert i dyprenna, men setningene opphørte da poretrykkene steg.

## Dyprenne II Parkveien:



Figur 11 Poretrykksendring og infiltrasjon Parkveien (Karlsrud, 1983)

Poretrykkene sank i denne dyprenna da tunnelen var 300 m unna, og infiltrasjon fra et eldre kjerneborhull på skrå langs kanten av dyprenna ble satt i gang. Det ble infiltrert inntil 30 l/min, som førte til en umiddelbar økning av poretrykket til normalnivå. Etersom tunnelen nærmet seg ble det boret to nye hull, men totalt 100 l/min var ikke nok til å holde poretrykkene oppe. Da tunnelen kom inn i en meget vannførende sone sank poretrykket dramatisk, og det viste seg at vann fra de to siste hullene gikk direkte inn i tunnelen. Brønnene ble avstengt. Fem supplerende hull i litt større avstand fra tunnelen tok sikte på å avskjære vannførende diabasganger som krysset under dyprenna. Infiltrasjon av totalt 150 l/min med trykk 1-1,5 bar bedret situasjonen, men poretrykkene steg ikke til normalnivå før etter utstøpning. Maksimal total setning var 4cm i det dypeste partiet av dyprenna med ca. 20 m til fjell.

## Dyprenne III:

I denne dyprenna over 200m fra tunnelen registrerte man først setninger på 2 cm/år, og det viste seg senere at det var en poretrykksendring på 4m. Et infiltrasjonshull ble boret innunder det dypeste partiet, og etter ca. 50 m traff man på en vannførende knusningssone. Det ble infiltrert ca. 40 l/min, og poretrykkene steg imiddelbart til over normalt nivå og setningene opphørte. Etter utstøpning og ettertetting ble infiltrasjonen avstengt og poretrykkene normale.

### 8.3.5 Avløpstunnel Frognerparken – Torshov

Avløpstunnelen ble drevet i 1979.

Det ble etter hvert registrert en del setninger i området ved Majorstua. Langsomt synkende poretrykk i løsmassene (0,2-0,3 m/år) og pågående setningsutvikling på bebyggelsen førte til vanninfiltrasjonsforsøk. Det ble utført en god del grunnboringer for å bestemme lokalisering av vanninfiltrasjonsbrønnene. På grunnlag av dette ble det boret tre vanninfiltrasjonsbrønner i området; Brønn 1 i Gardeveien, Brønn 2 i Jacob Aallsgate (begge september 1991) og Brønn 3 i Schøningsgate (november 1991). Alle hadde en lengde på ca 70 m og en vinkel 35-40° med horisontalplanet. Dybde til antatt fjell i området varierte mellom 7,5-27,6 m, og flere dyprenner med bløt til middels fast sensitiv leire hadde blitt kartlagt. Berggrunnen består av lagdelte sedimentærbergarter (kalkholdig leirstein, leirholdig knollet kalkstein) som stedvis gjennomskjæres av 0,5-10m brede eruptivganger med syenittisk eller basisk sammensetning.

Tester viste at de tre brønnene hadde influens på poretrykk ved fjell ikke bare nærmest brønnene, men også i avstand opp til 200 m unna. Brønnene hadde en klar positiv effekt på poretrykkene. Det ble besluttet å installere flere poretrykksmålere for overvåkning, også på flere nivåer et stykke opp i løsmassene for å se hvordan poretrykket bygde seg opp oppover i lagpakkene. Dette er avgjørende for hvor store vannmengder man skal infiltrere og under hvilket trykk.

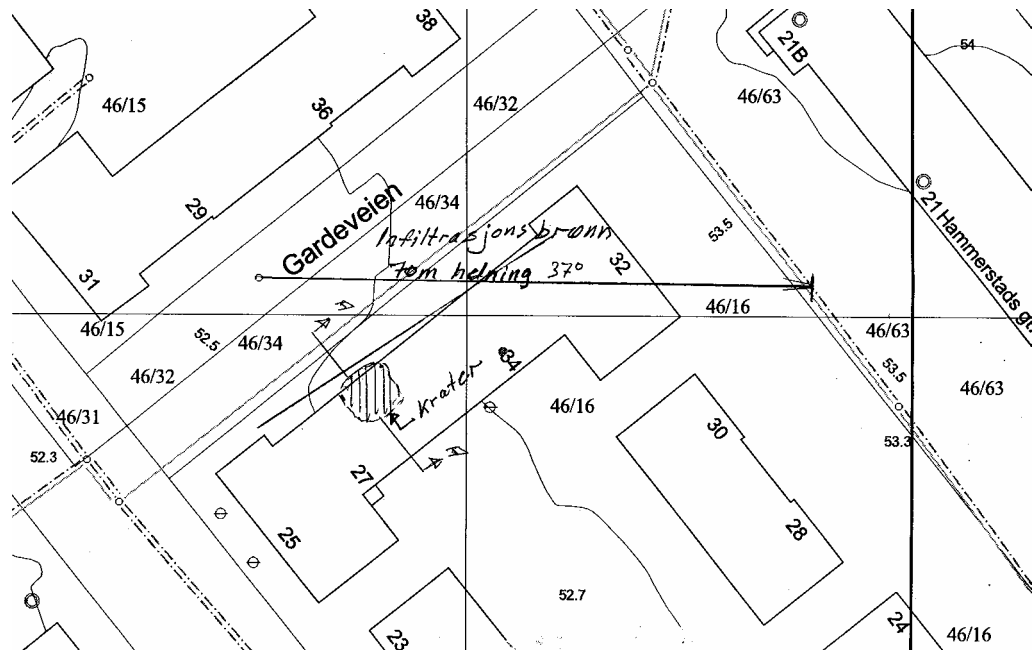
Driften av brønnene var vellykket i starten og svarte til forventningene. Med tiden har imidlertid kapasiteten til brønnene blitt dårligere. Det har vist seg at brønner til dels lekker og har fått nedsatt kapasitet. Et annet forhold er at lekkasjen i tunnelen har økt med tiden, og dermed har det gradvis blitt vanskeligere å holde poretrykkene oppe. Vinteren/våren 2003 har det blitt utført etterinjeksjon i tunnelen. Denne innsatsen har redusert lekkasjene, men på sikt innser Vann- og Avløpsetaten at tunnelen må gis en vanntett utføring.

Brønn 2 har infiltrert ca 10 l/min med trykk ca. 4 bar. Brønn 3 har infiltrert ca 15-20 l/min med trykk 2,5-3 bar. I en periode ble brønn 3 kjørt med større vanninngang. Presisjonssetningsmålere i det influerte området viste da små eller ingen setninger. Etter at vannmengden igjen ble redusert viste det seg at setningene fortsatte.

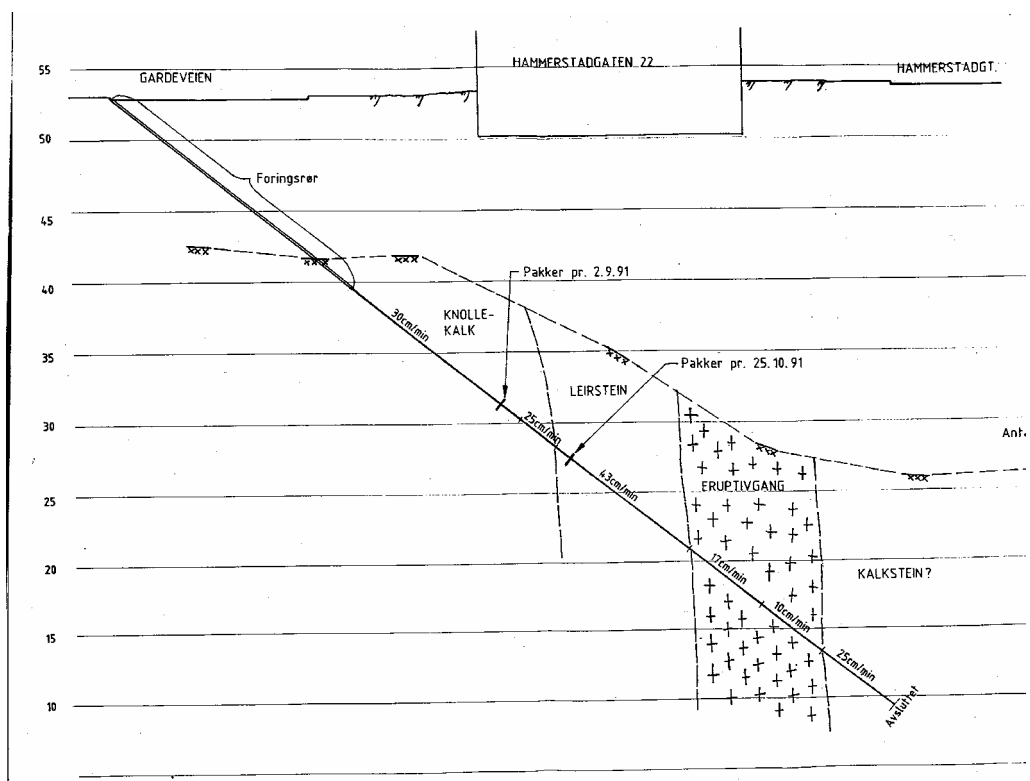
Brønn 1 forårsaket 9 oktober 2002 (Figur 12c) et krater under kjelleren i Trudvangveien 27 (Figur 12a). Krateret hadde et areal på 30 m<sup>2</sup> og et volum på 60 m<sup>3</sup> som senere ble gjenfylt med betong og pukk. Hendelsesforløpet er gjengitt i det etterfølgende basert på samtale med Helge Sem, Vann- og Avløpsetaten (VAV):

- Beboerne meldte om vannproblemer i kjelleren i januar 2002.
- Inspeksjonsgrop ble gravet opp og grunnvannstanden ble målt til 0,5 m under kjellergulvet, noe som er normalt.
- Det ble montert et peilerør som skulle følges opp av styreformannen i boretteslaget. Det ble ikke rapportert inn endringer. Etter kollapsen kom det frem at grunnvannstanden hadde endret seg, og stort sett hadde ligger 0,15 m under kjellergulvet, men det ble altså ikke rapportert inn til VAV.

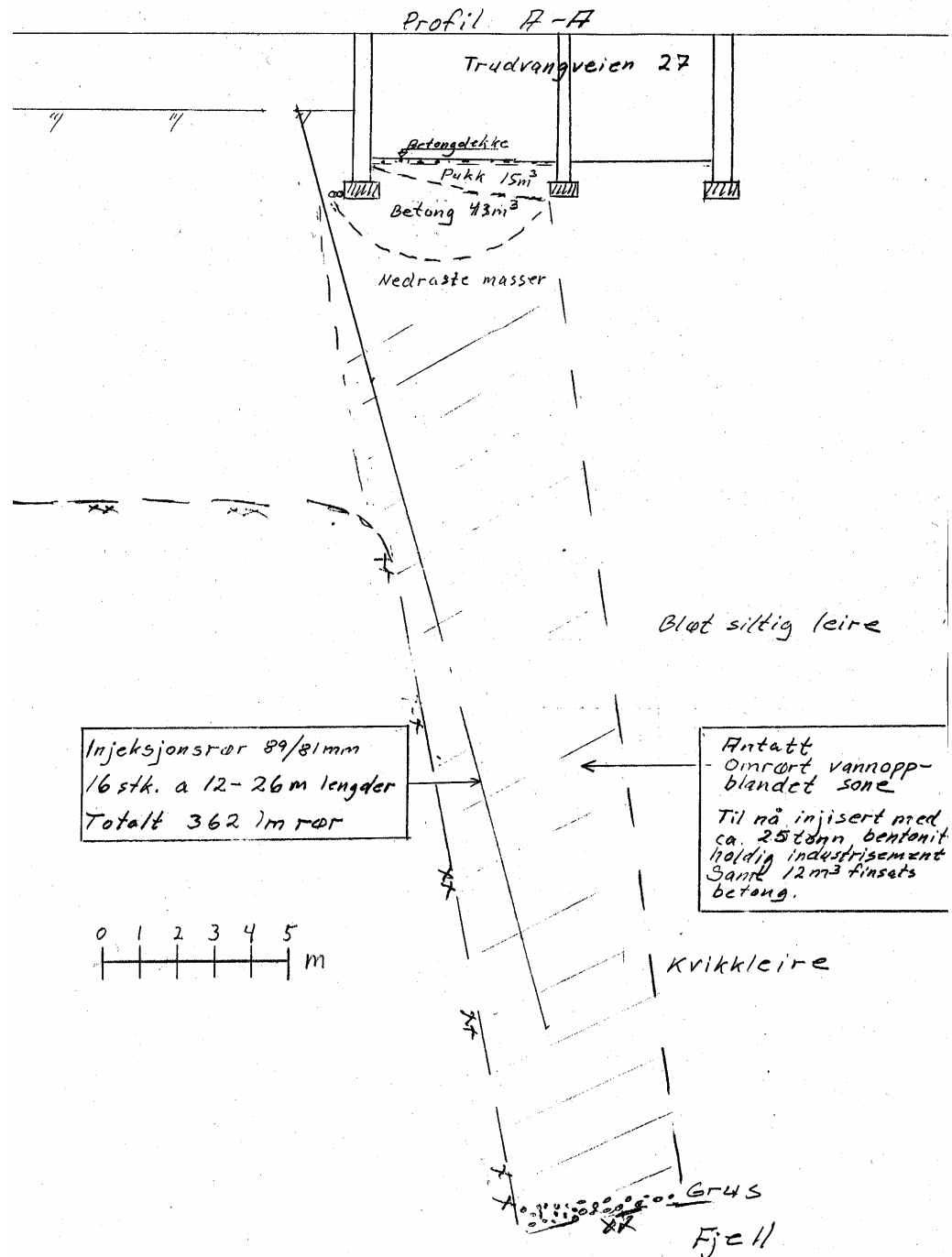
- Som et ”forstyrrende element” var det mistanke om at det var dårlig drenering rundt gården, og at tiltak for å rette opp dette ikke var blitt godt nok utført.
- 1 oktober 2002 var det gravd opp en inspeksjonsgrop ved fasaden. Da så man at det rant blakket vann fra under gården og ut i dreneringsystemet. Det ble da tatt mistanke til vanninfiltrasjonsbrønnen og den ble stengt.
- Nytt nivellement ble utført (gården var blitt nivellert jevnlig siden 1978) uten at disse nye målingene indikerte at det var ekstraordinære setninger på gang.
- 9 oktober 2002 gikk en av beboerne gjennom kjelleren for å vaske tøy. Vedkommende passerte det fremtidige krateret uten å registrere noe spesielt. Da vedkommende kom tilbake noen timer senere for å hente tøyvasken var deler av kjelleren borte og pipeløpet var sunket ned. 4 kjellerboder var rast sammen og innholdet befant seg i det vannfylte krateret.
- VAV kom til gården samme kveld, og registrerte blant annet at det raste fra kraterkantene, vannet boblet og terrenget på utsiden av gården sank noe sammen. Evakuering ble vurdert med tanke på at deler av gården kunne rase sammen. Situasjonen ble ikke vurdert så kritisk at evakuering ble gjennomført.
- 1 døgn etter kraterdannelsen var man i gang med tiltak. I første omgang ble det pumpet inn 43 m<sup>3</sup> betong i krateret. Senere etterfylt med 15 m<sup>3</sup> pukk. Dette var åpenbart ikke tilstrekkelig og det ble vurdert at undergrunnen var blitt svekket under og til siden for krateret. Sonderboringer ble gjennomført og man oppdaget at fjellforløpet var ganske annerledes enn antatt (sammenlign Figur 12c med 12b).
- Deretter startet man med stabiliserende tiltak ned mot bunnen av svekket sone. Her ble det først pumpet inn 12 m<sup>3</sup> med finsats-betong mens grunnvannet ble drenert ut gjennom rør. Etter 12 m<sup>3</sup> ble mottrykket for stort og det ble gått over til å injisere industrisement tilsatt bentonitt. Til sammen 25 tonn ble injisert gjennom 16 rør nedsatt i forskjellige dybder. Man startet nederst og fortsatte oppover mot overflaten. Hele injeksjonen pågikk i nesten én måned, noe som inkluderte pauser for å utjevne poretrykkene. Injeksjonen førte til noen lokale hevinger på bygården.
- Setningsmålinger viser at gamle målebolter (fra 1978) som før krateret var oppe i 62 – 73 mm setning per 1 april 2003 er oppe i 68 – 83 mm setning. Altså ingen voldsom endring. Nye bolter som ble montert på grunnmuren ved krateret umiddelbart etter kollapsen viser at man lokalt er oppe i maksimalt 30 mm setning på fasaden i mai 2003. Skjevsetningen er opp i maksimalt 24 mm. I de fem månedene som er gått etter avsluttet injeksjon er setningshastigheten per måned som følger: 7 mm, 3,7 mm, 2,5 mm, 2,0 mm og 1,4 mm. Før injeksjonen startet hadde man altså pådratt seg drøyt 10 mm setning og situasjonen ser nå ut til å stabilisere seg. Foto A, B og C viser fasaden mot Gardeveien etter at en del murpuss har blitt fjernet for å få bedre oversikt over skadomfanget



Figur 12a Brønn 1 Majorstua, Gardeveien. Korteste horisontalavstand mellom brønnen og krateret er ca 10 m.



Figur 12b Brønn 1 Majorstua, Gardeveien. Antatt fjellforløp langs brønnen den gangen den ble etablert.



Figur 12c Brønn 1 Majorstua, Gardeveien. Fjellforløp snitt A-A (Figur 12a) basert på undersøkelser etter kraterdannelsen.





Foto A Fasade mot Gardeveien – oversikt



Foto B Fasade mot Gardeveien – utsnitt (bildet er fordreid)



Foto C Fasade mot Gardeveien – utsnitt nedre del (bildet er fordreid)

Hendelsen med Brønn 1 Majorstua, Gardeveien, bør man forsøke å trekke noen lærdommer av. Det viktigste er forsøkt trukket ut i det etterfølgende:

- Sannsynlig årsak til erosjonen er injisert vann direkte i løsmassene, eller svært nær disse. Vannet har strømmet mot sør/sørvest og erodert masser under krateret.



- De eroderte massene har blitt transportert vekk gjennom bygårdens drenasjesystem og opp langs selve brønnen.
- Man har trolig boret for nært løsmassene fordi man ikke sjekket fjellforløpet grundig nok med boringer sideveis for brønntraseen før man boret brønnen.
- Setningsmålinger i forkant av kraterdannelsen ga ikke indikasjoner på at noe var i gjære. Kraterdannelsen kom som ”lyn fra klar himmel”.
- Overvåkingen av grunnvannstand gjennom peilerøret i kjelleren var mislykket da beboerne ikke rapporterte inn endringer. Man skal altså være forsiktig med å overlate overvåking til andre enn fagpersoner.
- Det er lett å tenke seg at det kunne gått mye verre med bygården enn det som faktisk skjedde. Allerede 1 døgn etter kraterdannelsen var man i gang med å stabilisere krateret med betong. Det skyldes sannsynligvis at VAV har en beredskap for å håndtere uforutsette hendelser. Oftest er det lekkasjer i vannledninger som utgjør uforutsette hendelser.
- Oppfølging av data fra brønnen kunne vært bedre, se neste avsnitt.

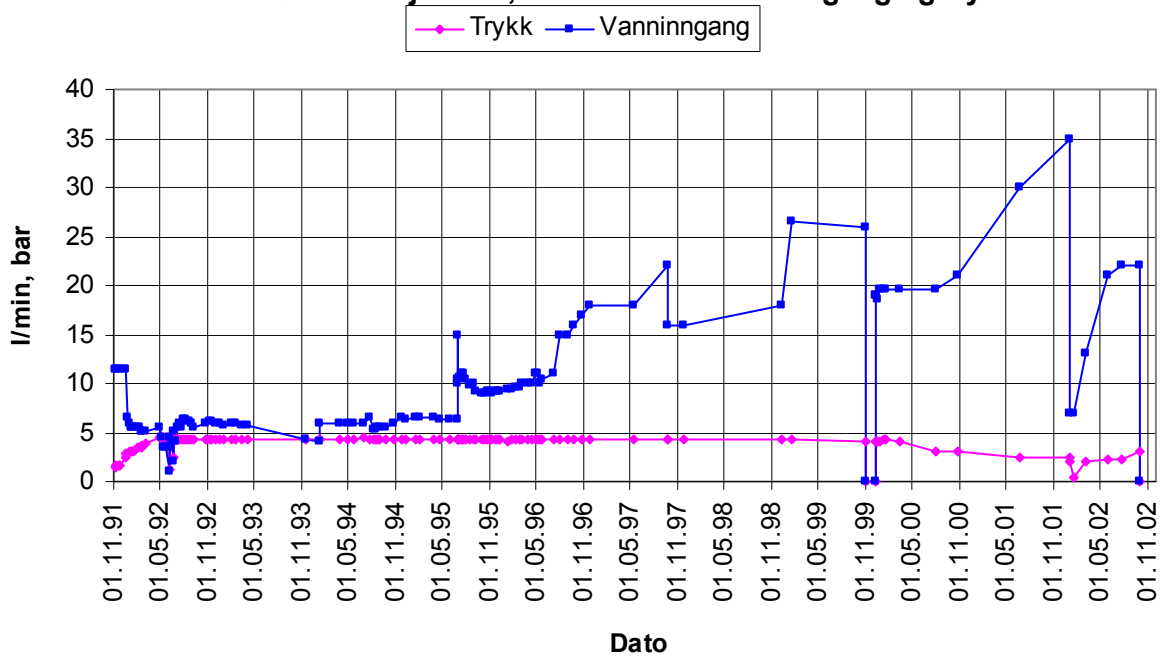
Figur 13 viser vanninngang og trykk for Brønn 1. Det bemerkes at det til dels er langt mellom punktene på grafen som viser utviklingen med tiden. Det skyldes at kun virkelige avlesninger er tatt med i datagrunnlaget. Kummene hvor avlesningene ble utført var under mange inspeksjoner ikke tilgjengelig fordi parkerte biler hindret adkomst, og det ble da loggført antatte verdier. De som hadde ansvaret for å følge opp registrerte data var ikke klar over dette, slik at man kan si at det har vært en svikt i kvalitetssikringen.

Det ses at brønnen har en nokså påfallende utvikling: Trykket er tilnærmet uforandret fra 1992 til 2000, deretter er det justert noe ned. Vanninngangen på sin side var tilnærmet konstant frem til midtveis i 1995, hvorpå den økte ganske dramatisk og holdt seg på et høyt nivå uten at trykket var økt, snarere ble redusert noe, før den ble stengt 2 oktober 2002. Forholdet mellom vanninngang og trykk viser meget stor spredning.

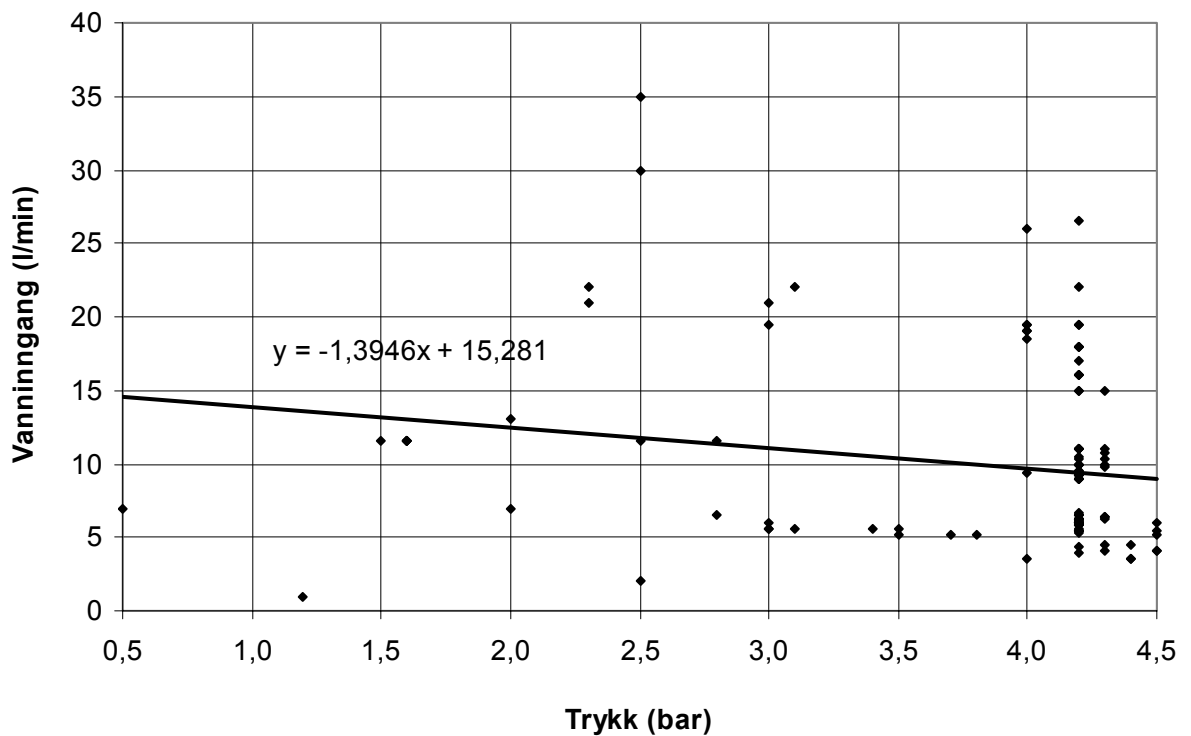
Ut fra Figur 13 ses at vannet strømmet lettere ut fra brønnen fra midtveis i 1995. Det synes rimelig å anta at erosjonen skjød fart, eller startet omtrent ved dette tidspunktet. I så tilfelle har erosjonen pågått for fullt i 7 år og 4 måneder. Antas at volumet av borterovert masse er større enn volumet av krateret ( $58 \text{ m}^3$ ) pluss volumet av finsats-betong som ble pumpet inn ved fjell ( $12 \text{ m}^3$ ) fås at volumet er større enn  $70 \text{ m}^3$ . Injisert masse er 25 tonn, omtrent lik  $25 \text{ m}^3$ . Hvor mye av dette som er gjenfylling av krater og hvor mye som er oppfylling av naturlig hulrom (porøsitet) i den sonen som er relatert til krateret og utenfor denne (massen har ganske sikkert forsvunnet også andre steder enn akkurat rundt krateret) er vanskelig å si. For regnestykket nedenfor er de  $25 \text{ m}^3$  ikke lagt inn.

$70 \text{ m}^3$  på 7 år og 4 måneder gir at erosjonen har foregått med en hastighet på 0,018 liter per minutt. Det tilsvarer 36 gram/min, eller 52 kg/døgn, forutsatt en romvekt lik 2 kg/liter. I samme periode var gjennomsnittelig vanninngang lik 14 liter/min. Dvs. at hver liter infiltrert vann i gjennomsnitt brakte bort 2,6 gram løsmasse.

### Brønn 1 Majorstua, Gardeveien: Vanninggang og trykk



### Brønn 1 Majorstua, Gardeveien: Vanninggang mot trykk



Figur 13 Brønn 1 Majorstua, Gardeveien. Vanninggang og infiltrasjonstrykk

### 8.3.6 Fjellinjen/Festningstunnelen

Ved Fjellinjen ble det i tillegg til vanntett betongutføring og omfattende forinjeksjon av fjellet benyttet kunstig vanninfiltrasjon for å unngå skader på omgivelsene i byggetiden. Det ble utført en rekke kjerneboringer for å kartlegge de geologiske forholdene i detalj og kartlegge fjellets permeabilitet. Ved installasjon av flere piezometere ble det avslørt at poretrykket lokalt allerede var svært lavt, antagelig pga. eksisterende fjellrom i området.

For Fjellinjen ble det prosjektert og etablert et stort antall hull for kunstig infiltrasjon av vann allerede før byggingen startet. Grunnen til dette var at det ville ta tid (inntil ca ½ år) fra uttak av fjellet til betongutføring var ferdig støpt og ettertettet, og man ønsket å unngå setninger og skader over denne tiden. Infiltrasjonshullene ble søkt plassert i vannførende soner i fjellet som kommuniserer godt med bunnen av dypprenene.

Poretrykksmålinger ble startet i juni/juli 1986. 66 poretrykks-/vannstandsmålere inngikk da i programmet, men antallet var økt til over 90 i 1989. 9 presisjonssetningsmålinger ble også igangsatt i 1986.

I 1987/88 ble det testet til sammen 22 infiltrasjonsbrønner i ulike dypprenner. 4 brønner var fra prosjektet Norges Bank, 1 fra NSB-tunnelen mens 17 brønner var nye. Poretrykkene i områdene steg stort sett betraktelig ved testingen. Flere av brønnene påvirket poretrykket over relativt store deler av dypprenene. Vanninngang ved ulike trykk ble testet. Flere av brønnene viste høyere vanninngang over tid ved lavt overtrykk, enn de viste på pakkertesten med høyt overtrykk.

Vanninfiltrasjon ga store utslag på poretrykkene. Vanligvis ble vannet infiltrert med 1 bars overtrykk. Det ble ikke benyttet trykk over 1,5 bar overtrykk. Ved svært god vanninngang ble det brukt noe lavere trykk.

Ved Ruseløkka har det vært i drift 6 brønner. Ved infiltrasjonstester med trykk 0,5-1 bar var infiltrert vannmengde fra 8-24 l/min per brønn. Fra 1988-1990 infiltrerte alle brønnene unntatt 1 mellom 5-10 l/min, mens 1 infiltrerte 20-35 l/min. Brønner ved Vestbanen viste ved testing en vanninngang på 42-67 l/min ved 1 bars trykk. Fra 1988-90 infiltrerte brønnene ca 10-35 l/min hver. To brønner i dypprenne ved Filipstad viste ved testing en vanninngang på 23-55 l/min ved 0,5-1 bar. I 1988-90 var infiltrert mengde variabel, men omtrent 30-40 l/min og 40-60 l/min. Brønner i dypprenne øst for Rådhuset viste ved testing en vanninngang på 7-21 l/min ved trykk 1-1,4 bar. I 1988-90 infiltrerte brønnene under 10 l/min hver. I dypprenna ved Myntegata, Akershus viste tester vanninngang på 17 l/min ved 0,5 bar. I 1988-90 ble det infiltrert rundt 10 l/min. I dypprenna ved Grev Wedels Plass viste tester vanninngang på 21-92 l/min ved 0,5-1 bar. I 1988-90 varierte infiltrert vannmengde mellom 20-80 l/min hver for to brønner og rundt 50 og 20 l/min.

I september 1989 var totalt 24 brønner installert. To nye brønner var installert på Framnes. Vanligvis ble vannet infiltrert med 1 bars overtrykk, og det ble ikke

benyttet trykk over 2 bar overtrykk. Ved svært lav vanninngang ble det brukt noe lavere trykk.

En brønn er fremdeles i drift ved Vestbanen. Brønnen er etablert fra terreng og har infiltrert ca 20 l/min med et infiltrasjonstrykk på 1-1,5 bar. Det er også i drift tre brønner ved Ruseløkka. Disse har infiltrert totalt 30 l/min med et infiltrasjonstrykk på 1-1,5 bar og er også etablert fra terreng.

En har gode driftserfaringer med disse brønnene bortsett fra behov for hyppig filterrens. Brønnene etterses hver 14. dag.

Ved boring av brønnene ble det benyttet 115 mm senkborhammer. Først ble 5” foringsrør boret gjennom løsmassene og ansatt 1-3 m i fjell og videre ble det boret med 115 mm fjellborkrone og vannspyling. Brønnenes dybde var generelt 60-90m og helningen varierte mellom 35-40° og 50-70°. Det ble gjort vanntapsmåling i alle hullene. Romslige kummer ble installert for at pakkere kunne installeres uten fjerning av kummen og eventuelt senere monteres for vedlikehold, og for at det skulle være plass til en isolert instrumentkasse for lettere tilgang til avlesninger. (pers. med. Grøndal, VAV)

### 8.3.7 Romeriksporten

#### 8.3.7.1 Generelt

Drenering av grunnvann i setningsømfintlige løsmasser medførte setninger. For å heve poretrykkene og gjenopprette grunnvannsbalansen ble det derfor satt i gang vanninfiltrasjon i flere områder under anleggsperioden; Godlia, Hellerud, Ellingsrud og Strømmen. På tross av injeksjonsarbeidene i tunnelen ble det ansett nødvendig med permanent vanninfiltrasjon. Det utføres også vanninfiltrasjon i Østmarka for å opprettholde vannbalansen. Jernbaneverket Region Øst fjernavleser brønner og poretrykksmålinger.

Brønnene ble boret med krone ca. 100-110 mm, og man begynte med mekaniske pakkere i de første brønnene. I de nyere brønnene, etter 1998, er det benyttet dobbeltpakkere.

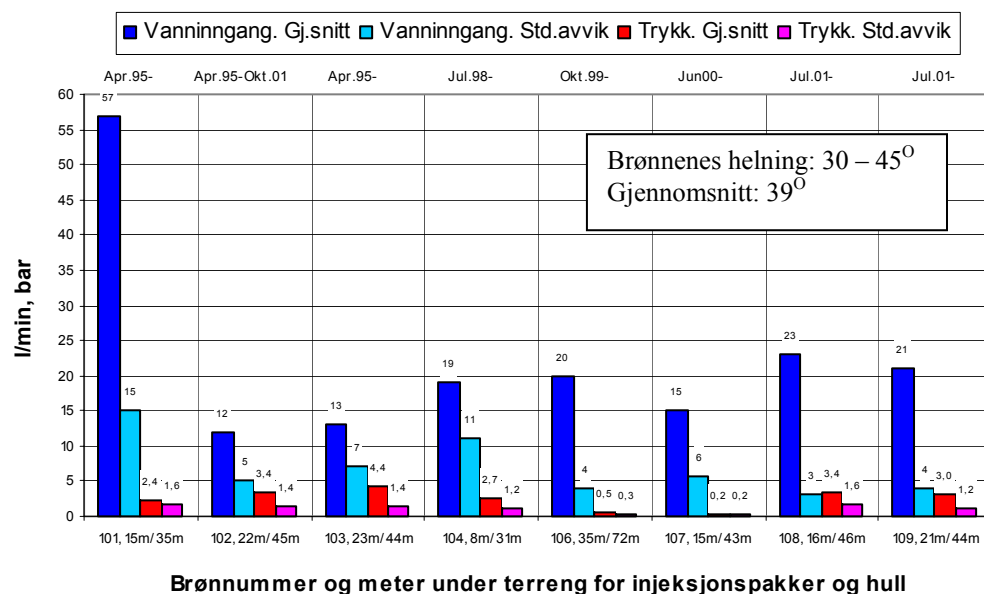
På Godlia, Ellingsrud og Strømmen ble det installert brønner tidlig. 3-4 brønner ved Hellerud og Ellingsrud har blitt hydraulisk splittet / kjørt under høyt trykk for å prøve å øke effekten der denne har avtatt. Resultatene var variable. (Jørn Grøndal, VAV)

Jernbaneverket leser nå av poretrykkene en gang per måned, mens Oslo kommune Vann- og avløpsetaten leser av brønnene en gang per måned og enkelte poretrykksmålere i forbindelse med testing og vedlikehold av brønner.

Ved oppsummeringen er statusrapporter og informasjon fra bl.a. Jørn Grøndal, Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten, benyttet.

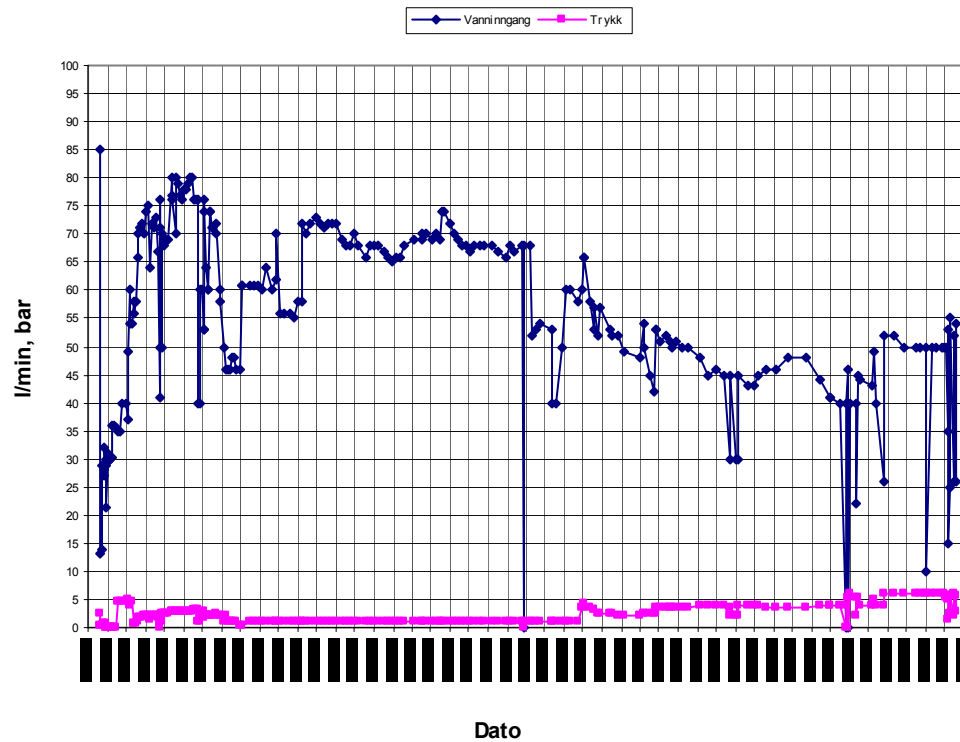
### 8.3.7.2 Godlia

På Godlia var det på forhånd satt ned en del poretrykksmålere, slik at man tidlig observerte at poretrykkene sank i området. Da tunnelen passerte under området falt poretrykkene markant. Det ble derfor raskt prosjektert og i utgangpunktet boret tre brønner tidlig i 1995. Disse var ikke ment å være permanente. Poretrykkene steg og lå til dels over gammelt referansenivå. Senere ble det også boret brønner fra tunnelen. Per 1 januar 1997 var det på Godlia i drift 3 brønner fra dagen og 4 brønner fra tunnelen. Brønnene fra tunnelen, som infiltrerte ca. 40 l/min, ble stengt av i desember 1997 da de kom veien for montering i tunnelen. I januar 1998 infiltrerte de 3 brønnene fra dagen ca. 100 l/min. Det var god samvirking mellom brønnene. Det viste seg da at det var for få brønner i området, og i 1998 og senere ble det derfor etablert flere. Figur 14 oppsummerer driftstrykk og vannmengder for brønner boret fra terreng.

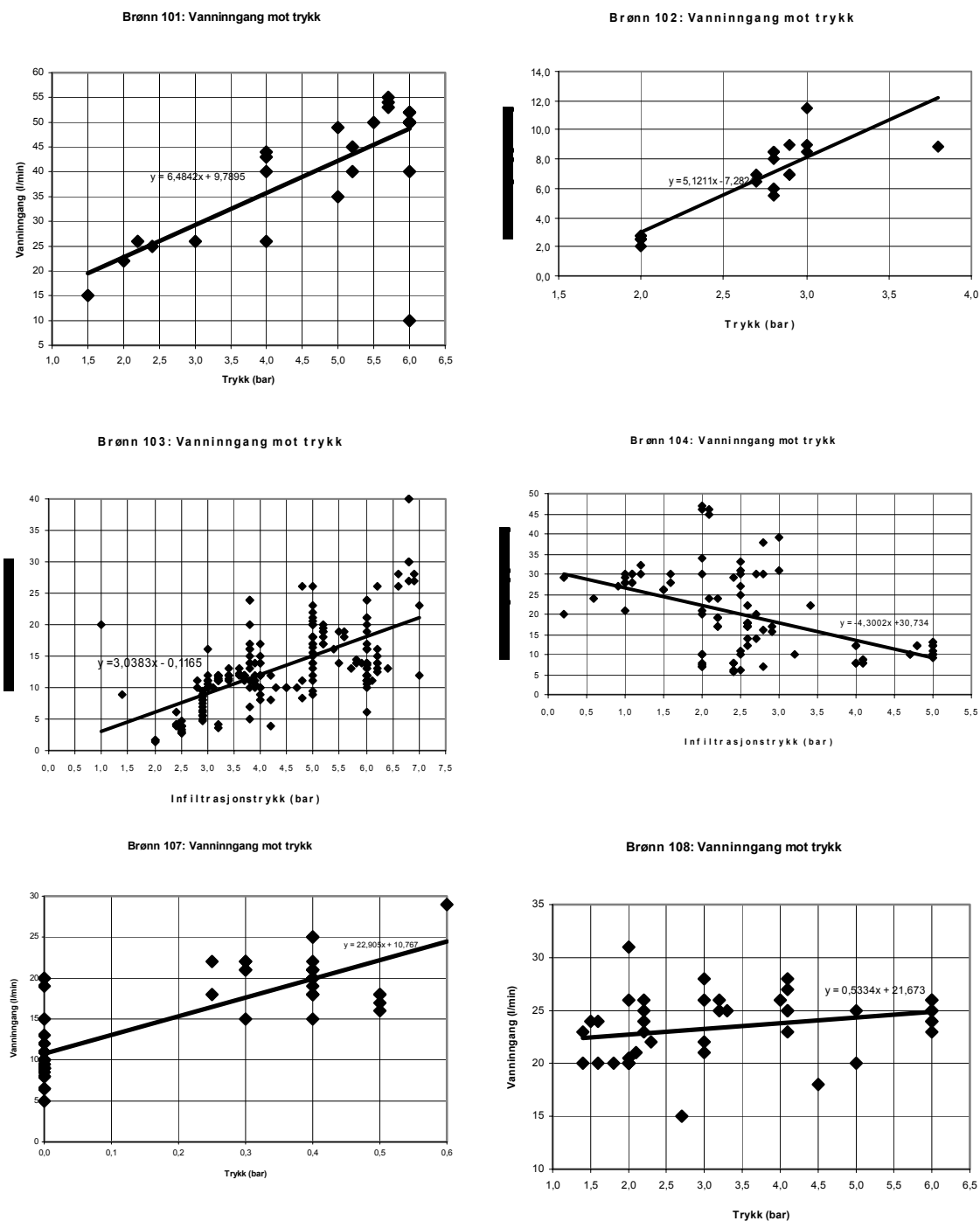


Figur 14 Brønner på Godlia: Sammenstilling av data - vanninnngang og trykk. Øverst i diagrammet er startdato vist, og sluttdato, om brønnen ikke er i drift per okt./nov. 2002

Figur 15 viser vanninnngang og trykk for Brønn 101 som et eksempel fra Godlia. Figur 16 og 17 viser forholdet mellom vanninnngang og infiltrasjonstrykk for brønner på Godlia.

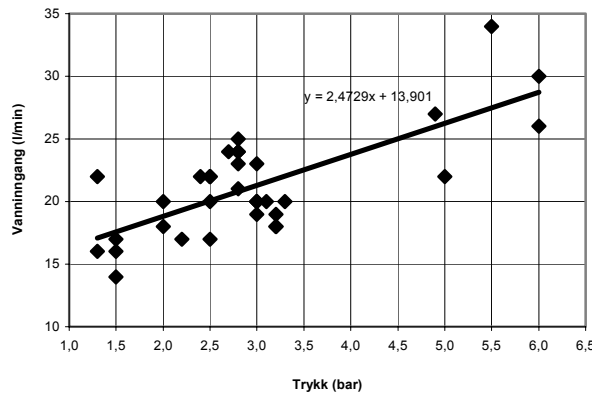


Figur 15 Brønn 101: Vanningang og infiltrasjonstrykktrykk



Figur 16 Brønn 101, 102, 103, 104, 107 og 108: Vanninggang mot infiltrasjonstrykk. Data er filtrert med hensyn til antatt pålitelighet av trykkmålere.

Brønn 109: Vanninnngang mot trykk



Figur 17  
Brønn109: Vanninnngang mot  
infiltrasjonstrykktrykk. Data  
er filtrert med hensyn til antatt  
pålitelighet av trykkmålere

Det fremgår av Figur 16 og 17 er det betydelig spredning fra et lineært forhold mellom vanninnngang og infiltrasjonstrykk selv om data hvor trykkmålere er ansett som upålitelige, ikke er tatt med i plottene.

Status sen-høsten 2002: Av i alt 22 poretrykksmålere hvor det er definert toleransegrenser, ”nedre”, ”normal” og ”øvre”, og ”nedre” grense er beregnet som sikkert nivå på poretrykk i forhold til å unngå mer setninger, ligger typisk poretrykket rundt ”normal” eller noe høyere.

På Godlia har man gode driftserfaringer. Generelt har det vært en del urent vann, og filtre i enkelte brønner har hatt en tendens til å tette seg. I hovedsak skiftes spesialfiltre én gang per måned. Sil vaskes ved hver inspeksjon.

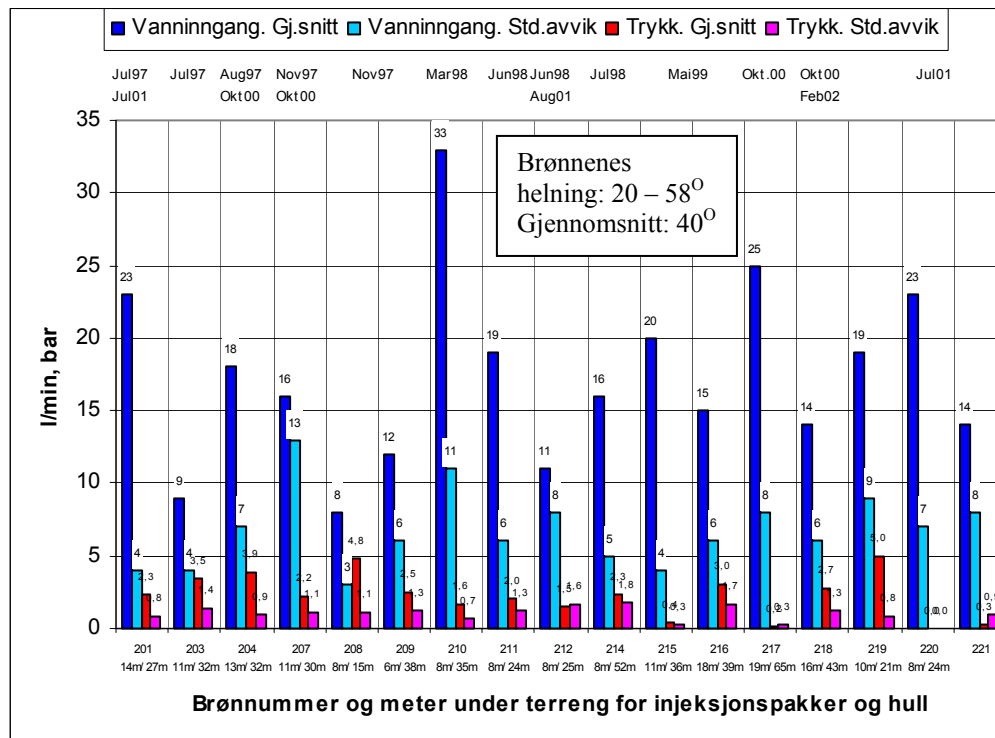
### 8.3.7.3 Hellerud

På Hellerud var det bare installert én poretrykksmåler til å begynne med. Det viste seg nødvendig med flere poretrykksmålere da poretrykket ved fjell forsvant og stigehøyden sank med over 11 m. Fallet i poretrykk ble registrert i januar 1996, men infiltrasjon ble ikke satt i gang før 16 måneder senere. Det var da registrert opptil 32 cm setning på hus i området.

I juli/august 1997 ble det installert 3 infiltrasjonsbrønner, og i november samme år ble det installert 3 brønner sentralt over tunnelen. I januar 1998 infiltrerte disse 6 brønnene ca. 170 l/min. På Hellerud førte de 6 brønnene til en markant heving av poretrykket i området. Enkelte steder ble poretrykket normalisert, andre steder lå det fortsatt godt under referansenivået. I april og juli/august 1998 ble det installert ytterligere 3 brønner. I slutten av august 1998 infiltrerte de 9 brønnene til sammen 155 l/min, 91 l/min i Hellerudrenna og 64 l/min i Trolldalsrenna. 16 brønner er operative i området per november 2002, men det infiltreres ikke nødvendigvis i alle brønnene samtidig. Status poretrykk sen-høsten 2002: Av i alt 43 poretrykksmålere hvor det er definert toleransegrenser, ”nedre”, ”normal” og ”øvre”, og ”nedre” grense er beregnet som sikkert nivå på poretrykk i forhold til å unngå mer setninger, ligger typisk poretrykket rundt ”normal”. Alle målere ligger innenfor toleransegrensene.



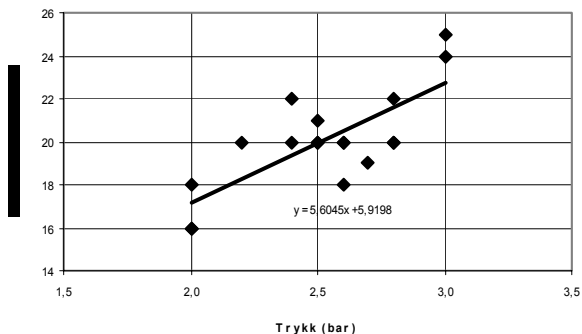
Figur 18 oppsummer driftstrykk og vannmengder for brønnene.



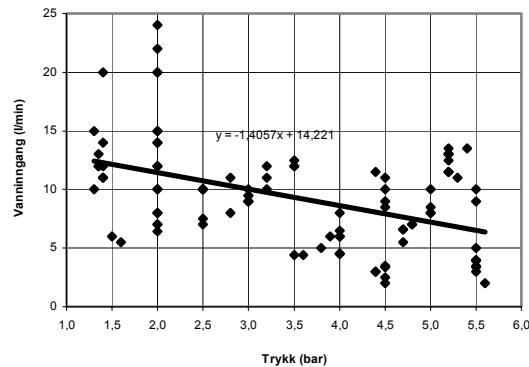
Figur 18 Brønner på Hellerud: Sammenstilling av data - vanninnngang og trykk. Øverst i diagrammet er startdato vist, og sluttdato, om brønnen ikke er i drift per okt./nov. 2002

Figur 19- 21 viser forholdet mellom vanninnngang og infiltrasjonstrykk for brønner på Hellerud.

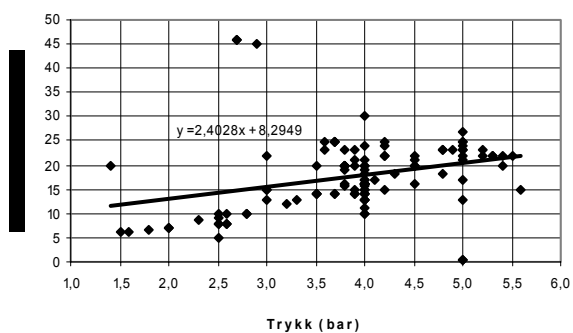
**Brønn 201: Vanninggang mot trykk**



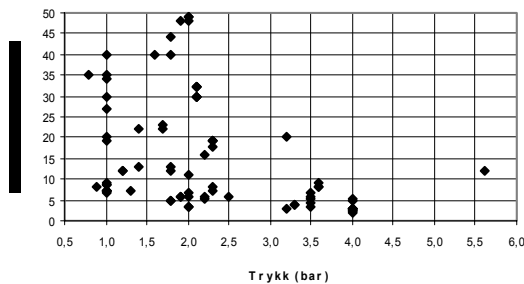
**Brønn 203: Vanninggang mot trykk**



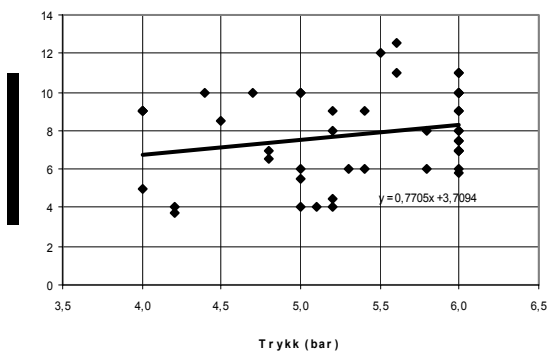
**Brønn 204: Vanninggang mot trykk**



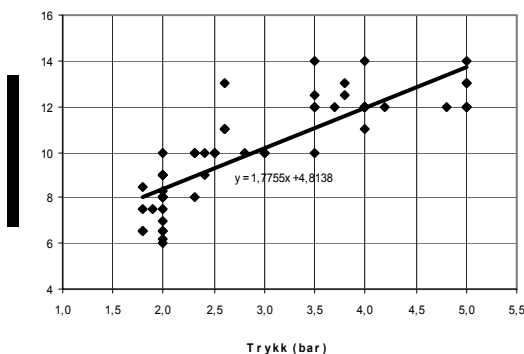
**Brønn 207: Vanninggang mot trykk**



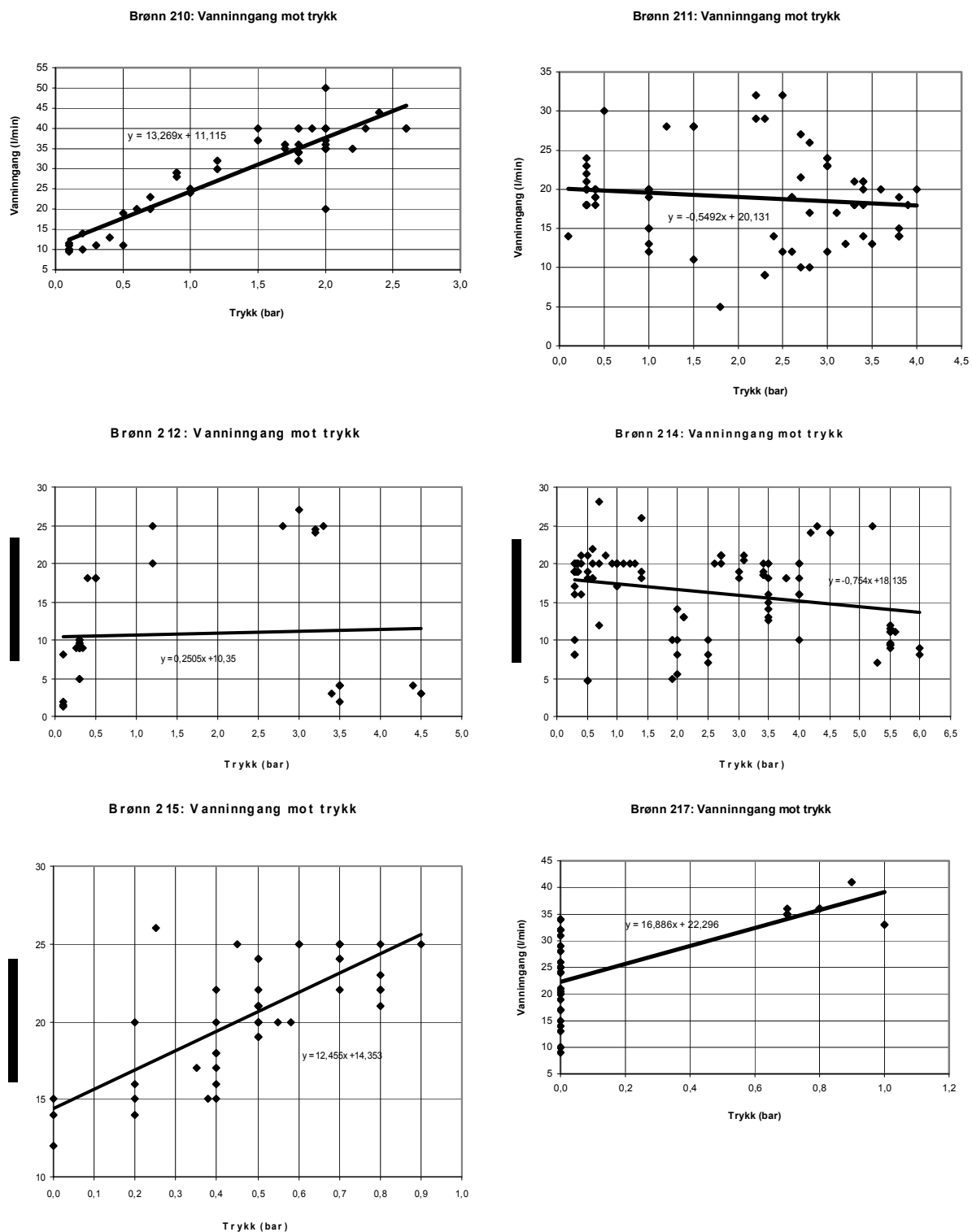
**Brønn 208: Vanninggang mot trykk**



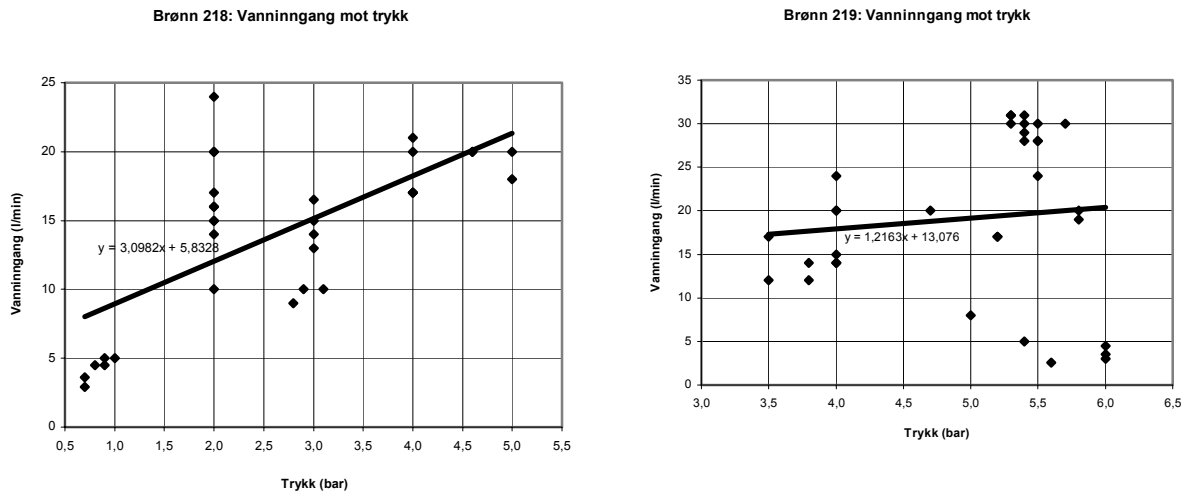
**Brønn 209: Vanninggang mot trykk**



*Figur 19 Brønn 201, 203, 204, 207, 208 og 209: Vanninggang mot infiltrasjonstrykktrykk. Data er filtrert med hensyn til antatt pålitelighet av trykkmålere*



Figur 20 Brønn 210, 211, 212, 214, 215 og 217: Vanninggang mot infiltrasjonstrykktrykk. Data er filtrert med hensyn til antatt pålitelighet av trykkmålere



Figur 21 Brønn 218 og 219: Vanningang mot infiltrasjonstrykktrykk. Data er filtrert med hensyn til antatt pålitelighet av trykkmålere

Det fremgår av Figur 19 – 21 at det betydelig spredning fra et lineært forhold mellom vanningang og infiltrasjonstrykk selv om data hvor trykkmålere er ansett som upålitelige, ikke er tatt med i plottene.

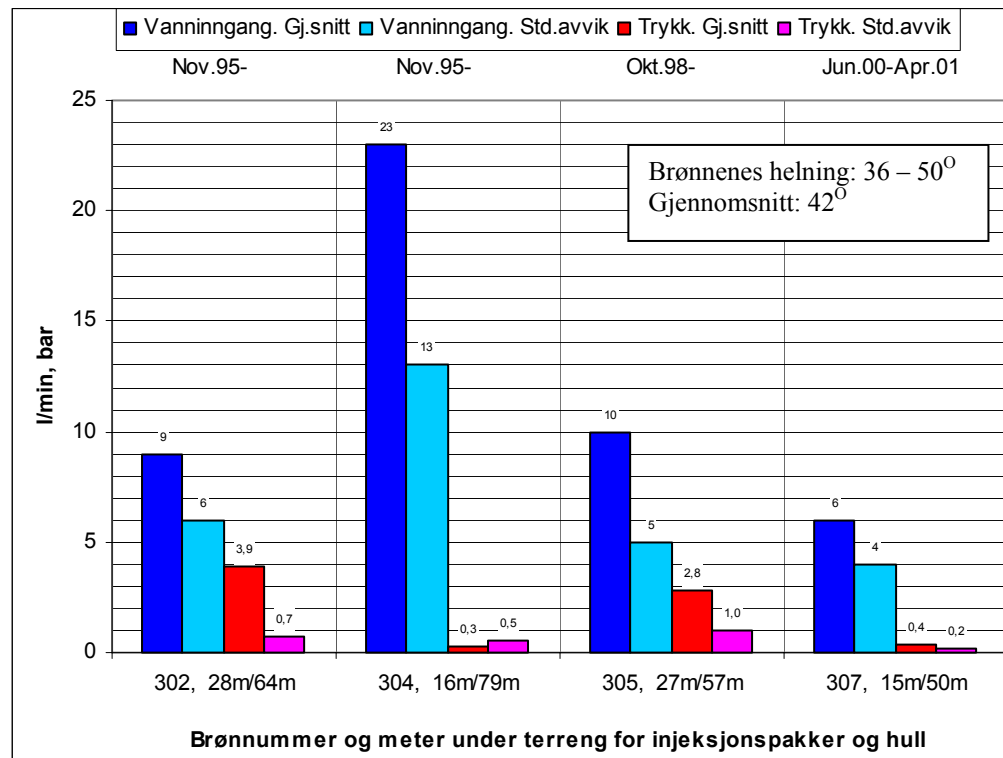
På Hellerud har man dårlige driftserfaringer. Generelt har det vært en del urent vann og filtre i enkelte brønner har hatt en tendens til å tette seg. Spesialfiltre må skiftes ut oftere enn én gang per måned..

#### 8.3.7.4 Ellingsrud

Høsten 1995/vinteren 1996 falt poretrykkene ved fjell ved en måler på Ellingsrud tilsvarende 11 m stighøyde. De andre målerne viste mindre fall i poretrykkene ved fjell. Da infiltrasjonen ble startet sent på høsten 1995 steg poretrykkene igjen, og lå tildels over gammelt referansenivå. De registrerte poretrykkene fluktuerte siden i takt med infiltrert vannmengde. Per 1 januar 1997 var det i drift 4 brønner ved Ellingsrud. Etter en periode da brønnene var stengt av ble 3 brønner satt på igjen i november 1997. Brønnene infiltrerte da ca. 42 l/min. Etter at brønnene ble satt på igjen steg poretrykkene et par meter, men de lå da lavt i forhold til anleggsstart.

I området har det blitt infiltrert 30-60 l/min mars 2001-mars 2002 fra 3-4 brønner. Infiltrasjonstrykk opp til 5 bar har blitt benyttet. En av brønnene ble splittet, og kapasiteten økte fra 5 til 14 l/min.

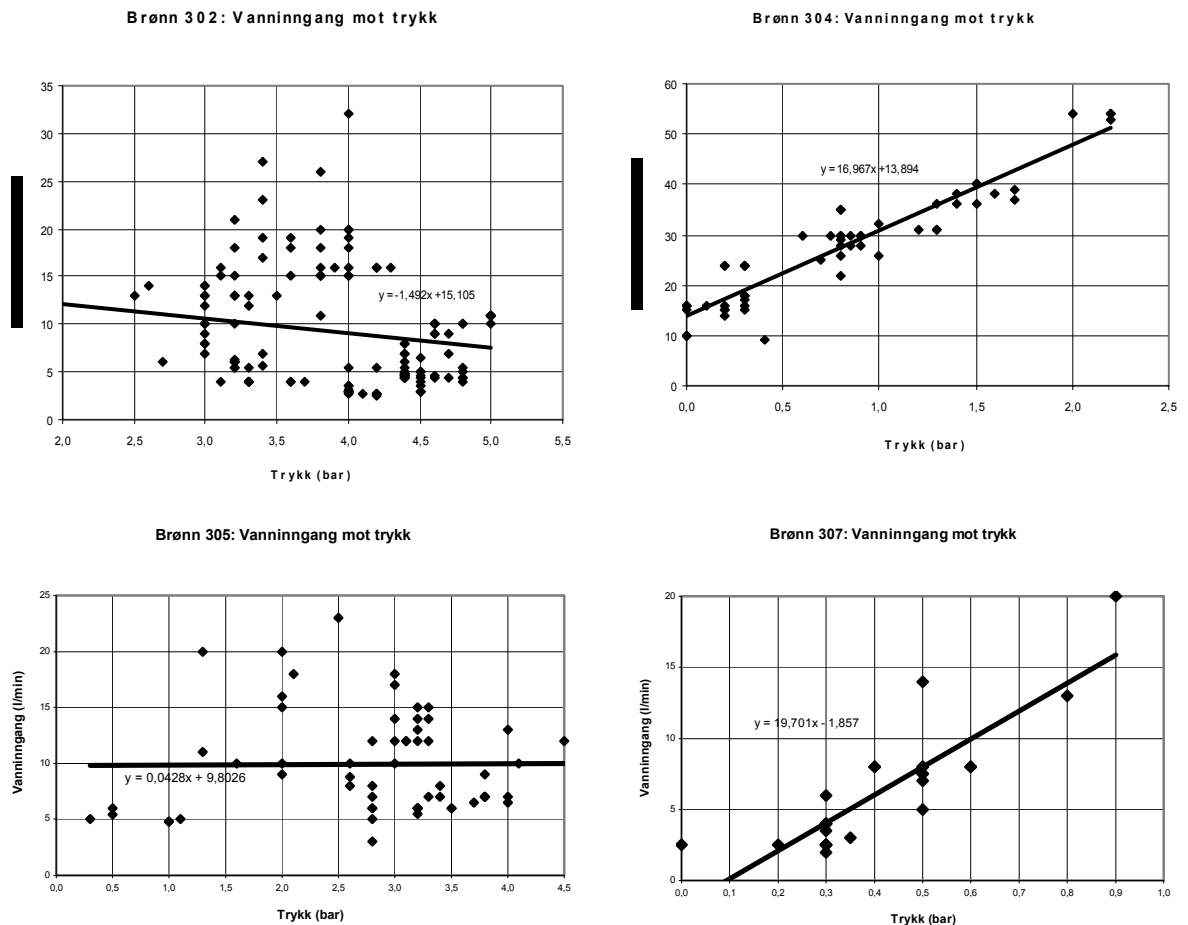
Figur 22 oppsummer driftstrykk og vannmengder for brønnene.



Figur 22 Brønner på Ellingsrud: Sammenstilling av data - vanninngang og trykk. Øverst i diagrammet er startdato vist, og sluttdato, om brønnen ikke er i drift per okt./nov. 2002

På Ellingsrud ble det også installert en løsmassebrønn som hadde liten effekt.

Figur 23 viser forholdet mellom vanninngang og infiltrasjonstrykk for brønner på Ellingsrud.



Figur 23 Brønn 302, 304, 305 og 307: Vanninnngang mot infiltrasjonstrykktrykk. Data er filtrert med hensyn til antatt pålitelighet av trykkmålere

Status poretrykk sen-høsten 2002: Av i alt 43 poretrykksmålere hvor det er definert toleransegrenser, ”nedre”, ”normal” og ”øvre”, og ”nedre” grense er beregnet som sikkert nivå på poretrykk i forhold til å unngå mer setninger, ligger poretrykkene som følger:

- Ved ”nedre” grense og noe over: 4 stk
- Mellom ”nedre” og ”normal”: 4 stk
- Rundt ”normal”: 7 stk
- Mellom ”nedre” og ”øvre”: 5 stk
- Rundt ”øvre”: 1 stk

Alle målere ligger dermed innenfor toleransegrensene.

### 8.3.7.5 Strømmen

Ved Strømmen var det et markant fall i poretrykkene ved fjell ved en måler fra sommeren 1995 tilsvarende 5-6 meter i stighøyde. Reduksjonen i poretrykk samsvarer godt med tunneldriften i området.

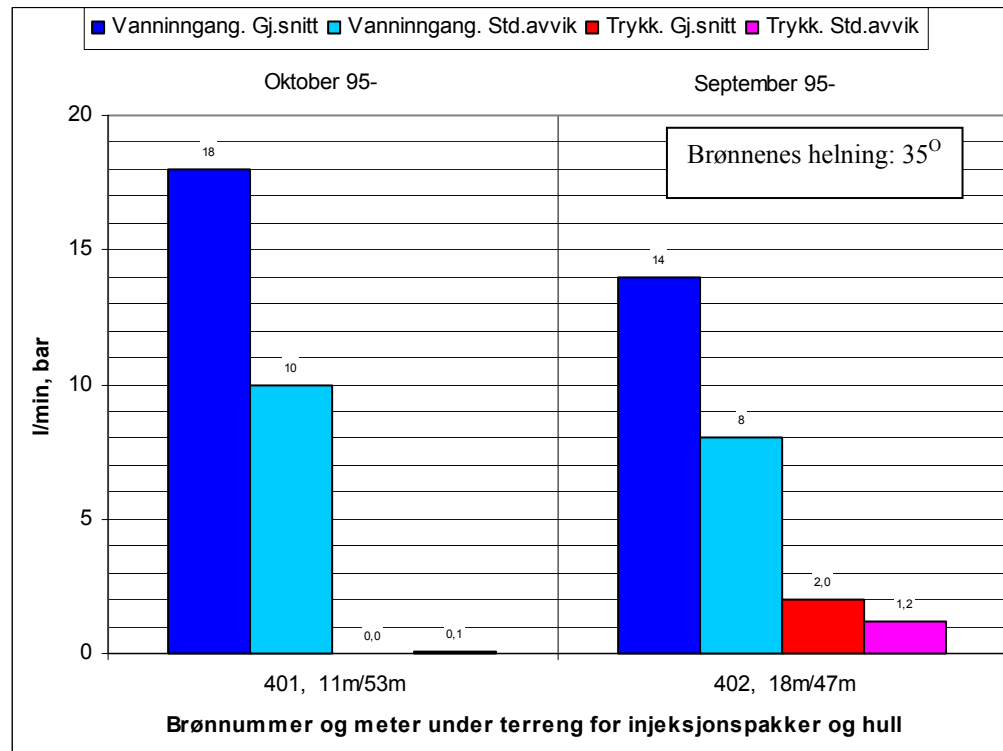
På Strømmen ble det boret tre brønner. En av dem var mislykket, slik at kun to av dem er i drift høsten 2002. Brønnene infiltrerer 20-30 l/min totalt. Brønnene har fungert bra, og det har vært lite vedlikehold. Filterne har vært skiftet ut en del ganger.

Da infiltrasjonen startet opp høsten 1995 steg poretrykkene igjen og lå tildels over gammelt referansenivå. Siden varierte poretrykkene med infiltrert vannmengde. Sommeren 1996 ble alle infiltrasjonsbrønnene slått av. Det ble da dramatiske fall i poretrykkene i området med inntil 11 m for en av målerne. I januar 1997 lå poretrykkene fortsatt langt under referansenivåene, og det var i drift 2-3 brønner. Senere har poretrykkene økt, og status poretrykk sen-høsten 2002 er som følger: Av i alt 43 poretrykksmålere hvor det er definert toleransegrenser, ”nedre”, ”normal” og ”øvre”, og ”nedre” grense er beregnet som sikkert nivå på poretrykk i forhold til å unngå mer setninger, ligger poretrykkene som følger:

- Ved ”nedre” grense: 3 stk
- Mellom ”nedre” og ”normal”: 4 stk
- Rundt ”normal”: 1 stk

Alle målere ligger dermed innenfor toleransegrensene.

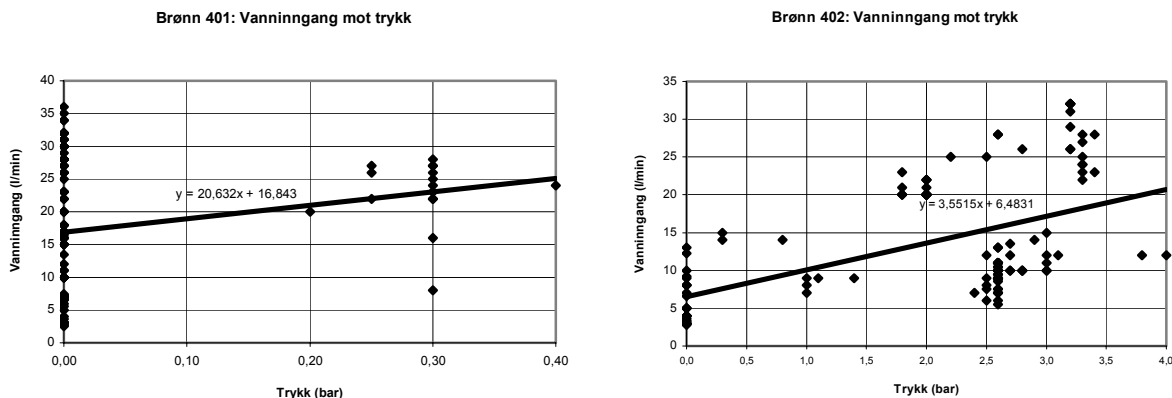
Figur 24 oppsummerer driftstrykk og vannmengder for to av brønnene.



Figur 24 Brønner på Strømmen: Sammenstilling av data - vanninngang og trykk. Øverst i diagrammet er startdato vis, og sluttdato, om brønnen ikke er i drift per okt./nov. 2002



Figur 25 viser forholdet mellom vanninnngang og infiltrasjonstrykk for brønner på Stømmen.



Figur 25 Brønn 401 og 402: Vanninnngang mot infiltrasjonstrykktrykk. Data er filtrert med hensyn til antatt pålitelighet av trykkmålere

#### 8.3.7.6 Østmarka

Jernbaneverket Region Øst rapporterer regelmessig til NVE tilgjengelige målinger, resultater og analyser angående vannbalansen i Østmarka.

I mai 1999 ble det satt i gang vanninfiltrasjon fra tunnelen i Puttjernsonen. Infiltrasjonsanlegget kjøres i tørre perioder og pumper drensvann fra tunnelen tilbake til fjellet. Det har stort sett vært daglig drift i tørre perioder med varierende daglig driftstid. Anlegget er forsøkt kjørt slik at vannbalansen er mest mulig lik det som er naturlig for årstiden i området. Infiltrasjonsanlegget har hatt en positiv innvirkning på grunnvannstanden i Puttjern-Kjerringmyr-området. I de periodene anlegget har vært i drift har det sørget for en økning av vannføringen i Puttjernbekken, slik at en ved hjelp av infiltrasjonsanlegget har fått en mer normal vannføring trass i lekkasjene til tunnelen. Infiltrasjonsanlegget har hjulpet til med å opprettholde vannstanden i Nordre Puttjern i tørre perioder. Uten anlegget er det antatt at vannstanden ville ha sunket med om lag 1 cm/døgn når vannstanden var under utløpsterskelen. Det ser ikke ut til at lekkasjene til tunnelen har forårsaket noen særlige utslag på vannstanden i Søndre Puttjern. Søndre Puttjern påvirkes positivt av infiltrasjonsanlegget indirekte via at vannstanden i Nordre Puttjern holdes oppe. Gjennom fjernoverføring av vannstandsverdiene følges utviklingen i vannene løpende fra dag til dag. Loggere med timeregistreringer ble installert i begge vannene i 1999.

Brønner som er påvirket av infiltrasjonsanlegget viser at grunnvannstanden reagerer umiddelbart når pumpene starter. Dette gjelder de dypeste brønnene, mens de grunne brønnene påvirkes i mindre grad ved normal drift av anlegget.

Infiltrasjon kan igangsettes umiddelbart når vannstandssituasjonen tilsier det. Dette er basert på fjernavlesning av sentrale vannstandsparametre i marka og interaktiv styring av vanninfiltrasjonsanlegget fra hovedkontoret. Det er utarbeidet

egne drifts- og vedlikeholdsprosedyrer for infiltrasjonsanlegget, og det har vist seg svært driftssikkert og enkelt å vedlikeholde (Myrabø og Færgestad, 2002).

### 8.3.8 Tåsentunnelen

Det er utført vanninfiltrasjon for å opprettholde poretrykkene i løsmasseområdene langs tunnelen.

Etter en viss tid ble det iverksatt infiltrasjon av vann fra tunnelen på følgende steder:

- Brønn 1, pr. 2610 vestgående løp (senere stengt)
- Brønn 2, pr. 2640 østgående løp
- Brønn 3, pr. 2755 østgående løp
- Brønn 4, pr. 2810 østgående løp
- Brønn 5, pr. 2790 østgående løp

Infiltrasjon fra brønnene ble startet opp i november 1998. Alle brønnene infiltrerer vann i dyprenner i et område rett vest for Tåsen, like under og rett sør for den gamle Ringveien (Kaj Munks vei). Poretrykk og setningsutvikling for bebyggelsen i området (lavblokkbebyggelse) følges opp. Vanninfiltrasjonen har hatt en tydelig og positiv effekt på poretrykksutviklingen. Den siste brønnen ble montert for ytterligere å bidra til å bedre situasjonen i den ene av dyprennene (dyprenne 3). Vanninfiltrasjonen stoppet effektivt setningene i dyprenne 3 (nærmest Tåsenkrysset) sør for tunnelen. Det var også her man hadde målt de største setningene, opptil vel 30 mm før vanninfiltrasjonen ble igangsatt.

Det satses på permanent vanninfiltrasjon ved Tåsentunnelen fra brønnene ved pelnr 2640, 2755, 2790 og 2810. Brønnene er koblet til permanent styresystem i pumpeump. Foreløpig har brønnene fungert som de skal. Vedlikehold har ikke vært nødvendig fram til høsten 2002. Dersom det er stopp i vanninfiltrasjonen reagerer poretrykkene momentant.

For brønnen ved pelnummer 2640 var infiltrasjonstrykket 6,5-7,5 bar, og vanninngangen 20-25 l/min i starten. Senere har infiltrasjonstrykket ligger mellom 10-12,5 bar og vanninngangen 20-50 l/min med et gjennomsnitt på ca 30 l/min.

For brønnen ved pelnummer 2755 startet infiltrasjonstrykket på 6-7 bar og en vanninngang på 30-35 l/min. Siden er trykket økt til 8-10 bar med en gjennomsnittlig vanninngang på 35 l/min.

Brønnen ved pelnummer 2790 infiltrerer vann med et trykk på ca 8,5-10 bar og en vanninngang på ca. 20-25 l/min.

Brønnen ved pelnummer 2810 infiltrerer vann med et trykk på ca 7,5-9,5 bar og en vanninngang mellom 10-20 l/min.

Her benyttet vesentlig høyere trykk enn for andre anlegg i Oslo-området, og siden så høyt trykk ikke fås direkte fra vann-nettet, er det installert en pumpe som forsyner de tre brønnene med vann.

Brønnene har vært skrudd noe opp og ned avhengig av poretrykksutviklingen i området, som også har blitt påvirket av driving av T-banetunnelen mellom Berg og Nydalen.

### 8.3.9 Nye Nationaltheatret stasjon

Nye Nationaltheatret Stasjon ble drevet i perioden november 1996 til november 1997. Betongutføringen for permanent tetting var ferdig etablert høsten 1999. Som midlertidig tetting av tunnelen ble det utført sementinjeksjon i bergmassen. Vestre inngang til Nationaltheatret Stasjon ble bygget i perioden vinter/vår 1996 til slutten av 1997. Annen byggevirksomhet i området er en byggegrop i Parkkvartalet. Arbeidene her startet i april 2000 og byggegropen var ferdig tettet i april 2001.

Det ble boret vanninfiltrasjonsbrønner både fra dagen og fra tunnelen for å sikre at poretrykkene ble holdt på et akseptabelt nivå. Det var knyttet ca 60 målere (poretrykksmålere og noen vannstandsmålere og peilebrønner) til prosjektet, de fleste til fjell, men det var også noen profiler med målere med målerspiss i forskjellige nivåer nedover i løsmassene. Målerne ble avlest med ulike intervaller, fra ukentlig til månedlig. En del av målerne har blitt målt på over en 25-30 års periode, andre over en 12-års periode, mens resten ble satt ned 1996-1998.

Vanninfiltrasjon ble utført i 4 delområder, henholdsvis:

1. Inkognitogt./Oscarsgt.  
Brønn D i Meltzers gt., brønn B i Inkognitogt, brønn E i Riddervoldsgt. og brønn T3, 5, 6 og 7 boret fra tunnelen. Brønnene har vært i drift 1997-2000 (for dette prosjektet). Brønn B,D og E ble etablert i 1977 (NSB-tunnelen).
2. Arbiensgt  
Brønnene T2, 4 og 9 ble boret fra tunnelen og var i drift 1997-1999.
3. Nationaltheatret  
Fra dagen ble følgende brønner boret: N1 i Karl Johansgt., N2 ved Nationaltheatret og N3 i Ruseløkkvn. T8 ble boret fra tunnelen. Brønnene var i drift 1997-1999.
4. Ruseløkka  
Brønn A4 ved Parkveien var i drift i 1996-1998. Brønnen hørte til et vanninfiltrasjonsanlegg knyttet til Fjellinjen og etablert i 1986. Brønnen ble faset ut og gyst pga. lekkasje, se Kapittel 8.3.6.

Brønnene ble avlest og ettersett med omtrent samme hyppighet som poretrykksmålerne, som en del av rutinene knyttet til målerundene i området. Vanninngang og trykk ble avlest og nødvendige justeringer og rens av filtre ble foretatt.

Alle brønnene i dagen ble koblet til offentlig nett. Boring og installasjon av brønnene i dagen var vanskelig å gjennomføre i det tett utbygde området. Det ble infiltrert vann fra i alt 16 brønner.

Filtrene i enkelte av brønnene tettet seg pga. arbeider på ledningsnett i enkelte perioder, noe som ofte medfører mye partikler i drift i vannrørene. Filtrene ble vanligvis ettersett ved hver avlesning.

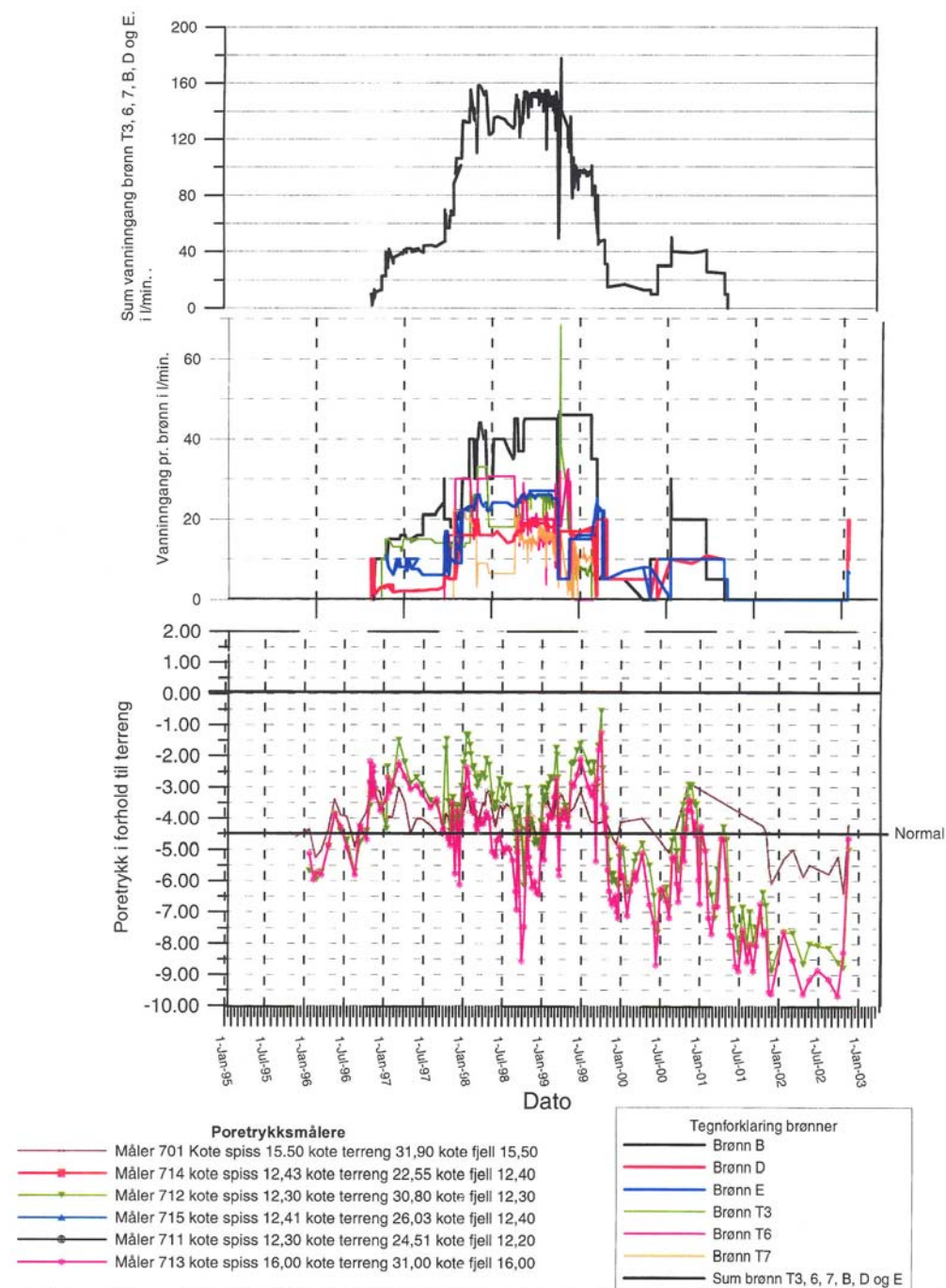
Brønner som ble boret fra tunnelen ble koblet til anleggsvannet, og var i drift i perioden 1997-1999 (T2-10). En hadde noen mindre problemer med disse brønnene, bl.a. ble vannforbindelsen i tunnelen koblet av i kortere perioder.

#### Parkveien/Inkognitogata:

Tre av brønnene som ble benyttet ved bygging av NSB-tunnelen ble reetablert. Det er dårlig og oppsprukket fjell i de to dypprenene og de er forbundet hydrogeologisk, primært gjennom oppsprukkete N-S-gående eruptivganger. En poretrykksreduksjon på opp til 12 m ble registrert ved bygging av NSB-tunnelen. Etter utstøpning og ettertetting steg poretrykkene til normalt nivå, og infiltrasjonen ble trappet ned. Utbyggingen av Park-kvartalet i 2000/2001 har også påvirket poretrykkene i området. Det foregikk derfor også vanninfiltrasjon fra brønn B, D og E juli 2000 til mai 2001.

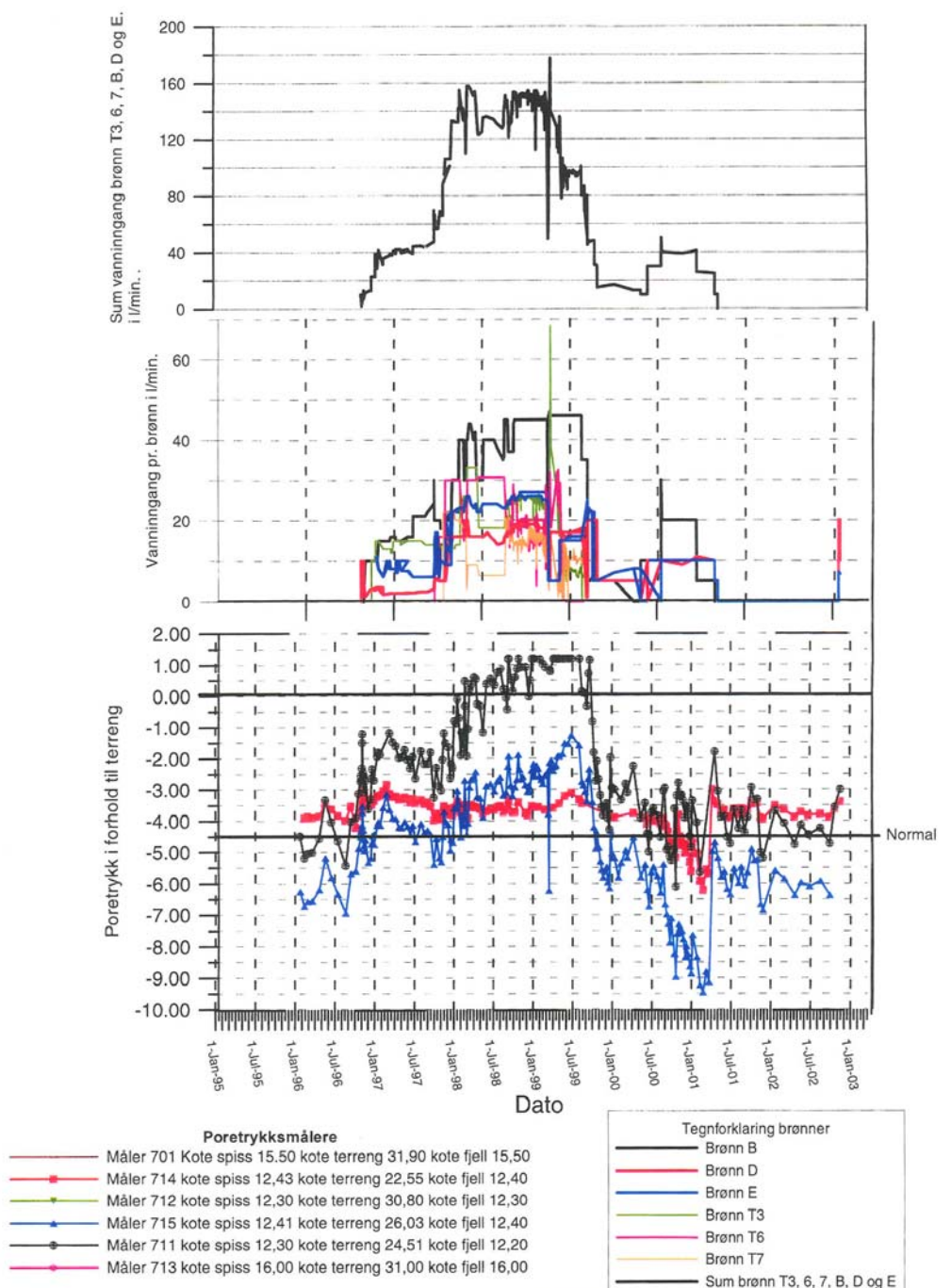
Ved utvidelsen av Nationaltheatret stasjon har det vært svingninger i poretrykkene, og de største svingningene har vært nærmest utvidelsen i tunnelen eller i tilknytning til geologiske formasjoner som har kontakt med denne. I den mest aktive fasen av anleggsarbeidene var poretrykkene lavere enn normalnivået. Da infiltrasjon fra brønn B, D og E startet gikk poretrykkene opp til normalnivået igjen. Poretrykkene har ikke vært nede på de samme lave nivåene som på 70-tallet. Kun i korte perioder har enkelte målere ligget under normalnivået, bortsett fra to målere som har stabilisert seg 1-2m lavere enn forventet normalnivå. Om det er nødvendig med permanent vanninfiltrasjon i dette området er for tiden til vurdering, og avhenger av setnings- og poretrykksutvikling.

Figur 26 og 27 viser infiltrert mengde vann og poretrykk for Parkveien/Inkognitogata. Effekten av vanninfiltrasjonen vises tydelig, og man ser at poretrykkene faller når vanntilførselen stenges.



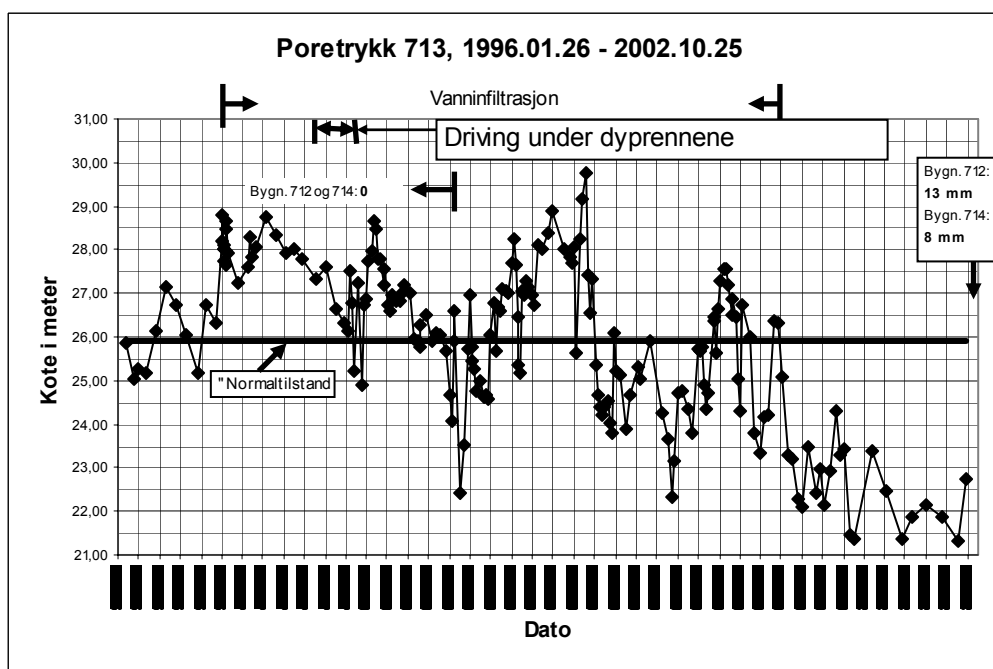
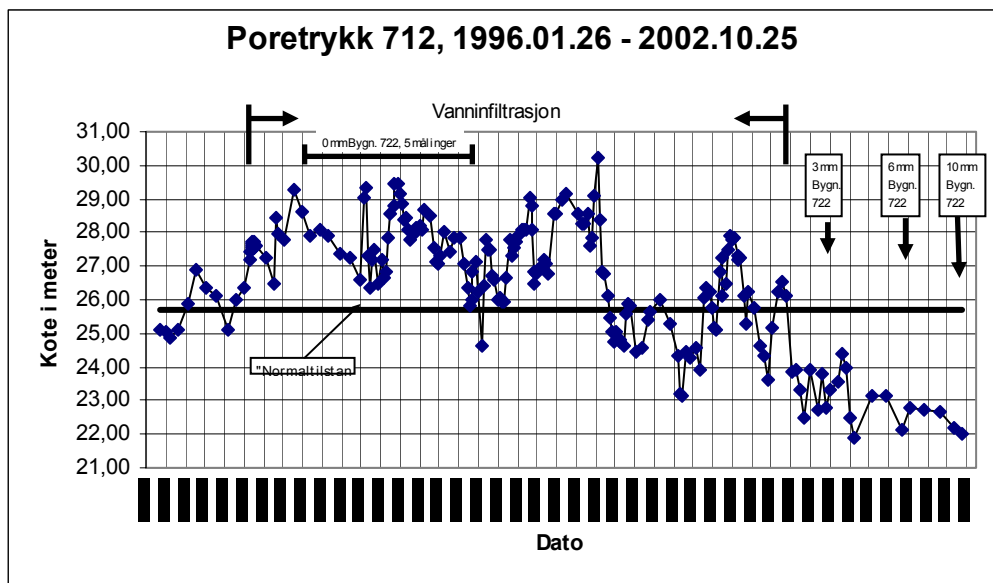
Figur 26 Dyprenne Parkveien/Inkognitogata. Vanninfiltrasjon og poretrykk for Måler nr. 701, 712 og 713 (Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten 2002).



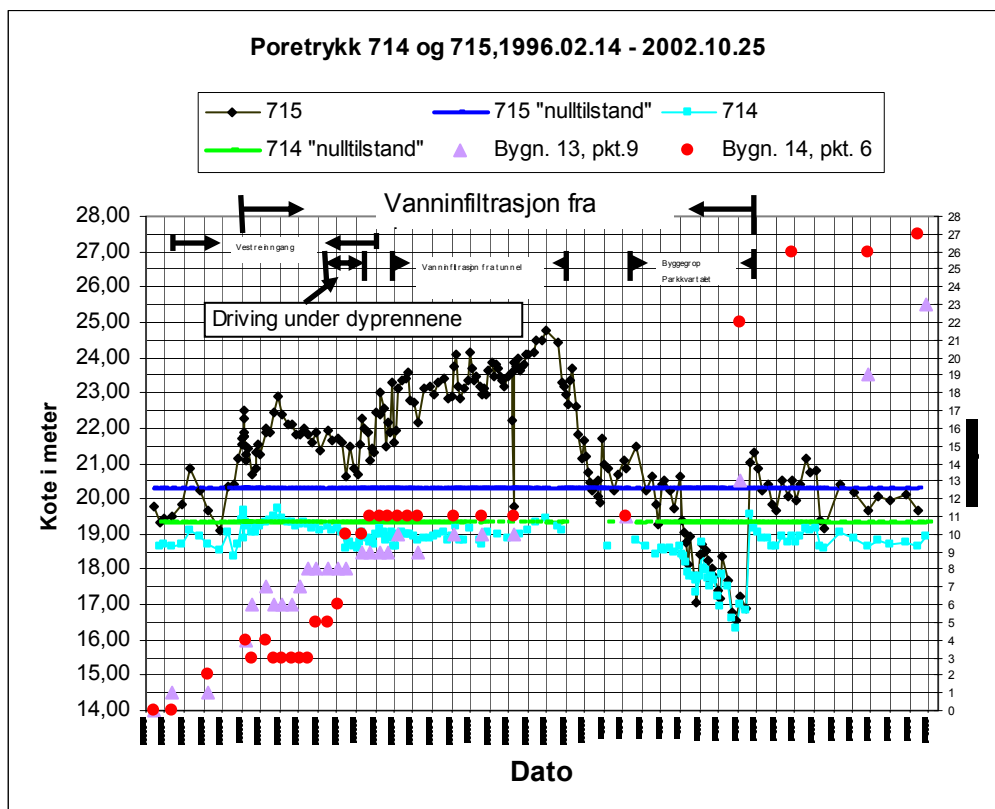


Figur 27 Dyprenne Parkveien/Inkognitogata. Vanninfiltrasjon og poretrykk for Måler nr. 711, 714 og 71. (Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten 2002).

Figur 28 viser detaljer, inklusive setninger, for noen bygninger.







Figur 28 Dyprenne Parkveien/Inkognitogata. Vanninfiltrasjon, poretrykk og setninger.

#### Arbiensgt.:

Som følge av NSB-tunnelen sank poretrykkene 6-8m under normalnivået på 70-tallet. Ved anleggstart i 1996 lå poretrykket ca. på normalnivået fra 1980/81. Poretrykkene har vært sterkt påvirket av anlegget og infiltrasjonen, med tilhørende svingninger. Vann ble infiltrert mellom desember 1996 og april 1999, og foregikk fra tunnelen. Det ble infiltrert 20-70 l/min, for det meste rundt 20 l/min på hver brønn. Selv om det har vært en del svingninger har poretrykkene ikke vært lavere enn 3-4 m høyere enn de laveste i 1977. Kun i kortere perioder har de ligget 1-3m under normalnivået. Ellers har det poretrykkene tidvis ligget over normalnivået pga. vanninfiltrasjonen.

Brønnene ble boret og startet opp så snart en oppdaget at poretrykkene i området begynte å synke

#### Nationaltheatret:

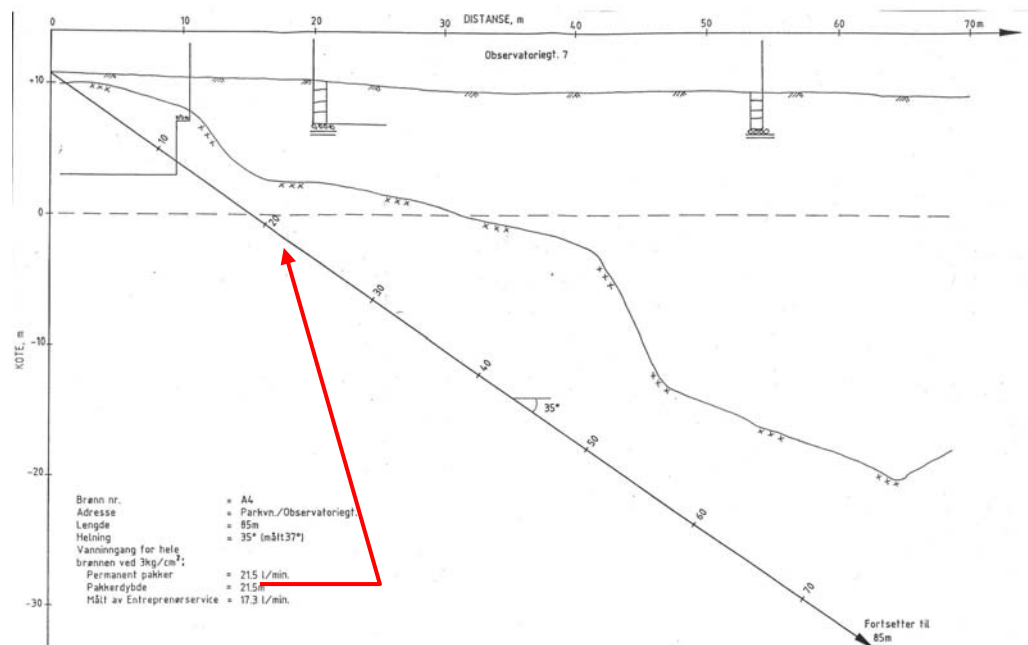
Området har hatt poretrykksreduksjoner i flere faser, ved blant annet T-banetutbyggingen og NSB-tunnelen. I anleggsperioden hadde poretrykkene en svak senkning på inntil 1m under normalnivået, bortsett fra én av målerne tett inntil byggegroppen, som april 1998 til mars 1999 var nede i 4-8m under normalnivået. Siden har poretrykket vært normalt. Vanninfiltrasjon fra 3-4 brønner har holdt poretrykkene oppe på et akseptabelt nivå. På det meste ble det infiltrert ca. 130 l/min i området i 1998-1999. Senere ble det infiltrert 12 l/min fra dagen og 7-

l/min fra tunnelen. Brønnene ble stengt mai 1999. Poretrykksreduksjoner i anleggsperioden var i kortere perioder på inntil 2 m. Sannsynligvis har poretrykkene vært betydelig lavere ved tidligere utbygging.

Brønnene som ble boret i dagen ved Nationaltheatret ble boret med 100 mm krone eller grovere, og det ble sett ned mekaniske pakkere.

#### Ruseløkka/Vestbanen:

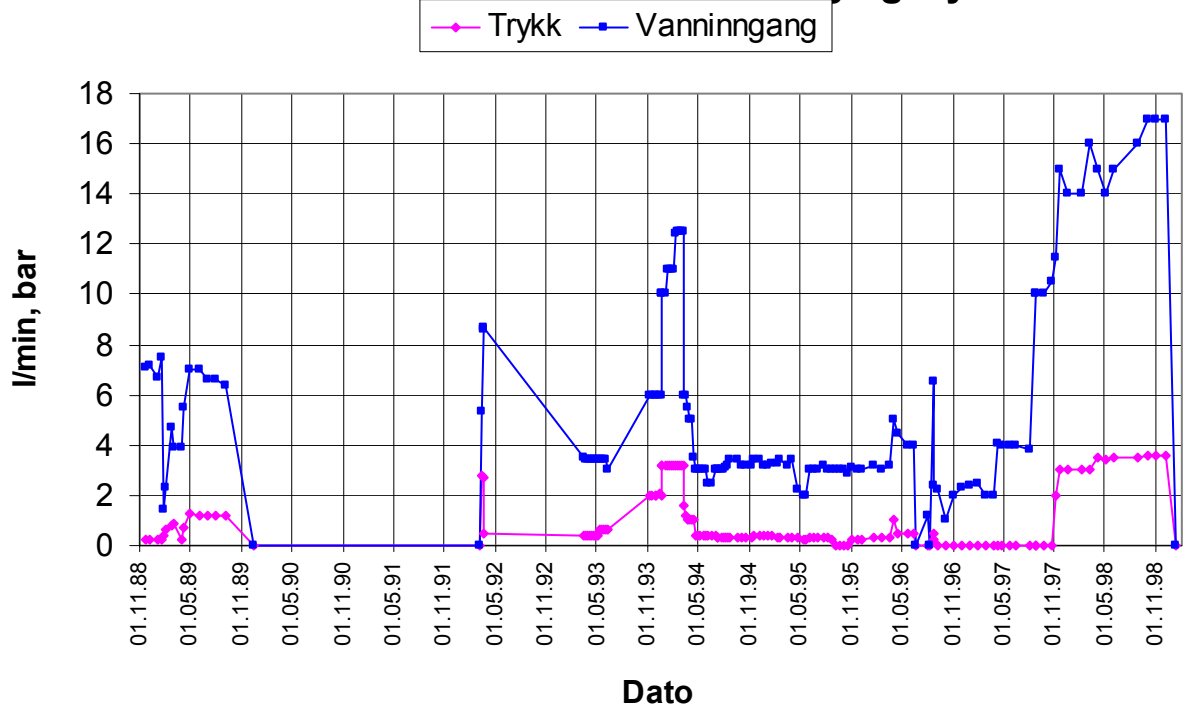
Dyprenna har tidligere vært påvirket av NSB-tunnelen, Vestbanekrysset, Festningstunnelen og utgraving for Storebrand-bygget. Tidligere har det vist seg at små og store terrenginngrep raskt har påvirket poretrykkene, og permanent vanninfiltrasjon har vært nødvendig for å unngå skadelig setningsutvikling. Poretrykkene har i ingen eller ubetydelig grad vært påvirket av utvidelsen av Nationaltheatret. Brønnene i området har infiltrert 0-20 l/min hver. I forbindelse med Festningstunnelen (Fjellinjen) ble det boret en del brønner i Ruseløkkaområdet 1987/88. To av disse brønnene går fremdeles, og har hatt virkning for anlegget ved Nationaltheatret. En annen av disse brønnene, Brønn A4, ble stengt desember 1998 fordi den ga lekkasje opp i kjelleren i Observatoriegaten 7, hvor det dannet seg et krater under kjelleren. Krateret var ca 2 m i diameter. Brønnens beliggenhet og antatt fjellforløp er vist i Figur 29. Som det fremgår av Figur 29 er det kort avstand mellom brønn og antatt fjelloverflate. En mulig (eller sannsynlig) årsak til erosjonen og kraterdannelsen er at brønnen er i direkte kontakt med løsmasser, eller svært nær eroderbare løsmasser ved fjell.



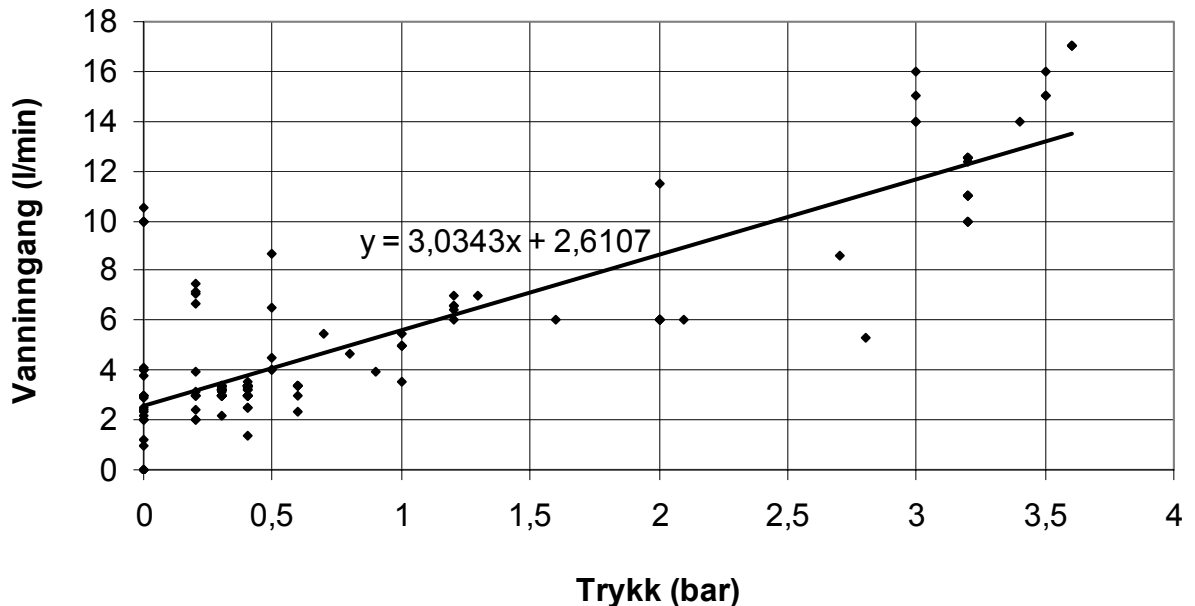
Figur 29 Brønn A4 Ruseløkka. Lengdesnitt langs brønnen

Figur 30 viser vanninggang og trykk for Brønn A4.

## Brønn A4 Ruseløkka: Vanninggang og trykk



## Brønn A4 Ruseløkka: Vanninggang mot trykk



Figur 30 Brønn A4 Ruseløkka. Vanninggang og infiltrasjonstrykk

Sammenligner man Brønn A4 Ruseløkka (Figur 30) med brønner som er etablert for Romeriksporten (Figur 16, 17, 19, 20, 21 og 23) ses intet påfallende ved

forholdet mellom vanninngang og trykk som kunne gi en indikasjon om erosjonen som har pågått.

#### Oppsummering Nye Nationaltheateret Stasjon:

I helhet har det i kortere perioder i anleggsperioden vært mindre senkninger av poretrykkene, som raskt ble hevet bl.a. ved hjelp av midlertidig vanninfiltrasjon. Situasjonen etter arbeidens og vanninfiltrasjonens avslutning tilsvarer omtrent den før anleggsstart, og det ser ut til at poretrykkene generelt har stabilisert seg. En har vært forholdsvis fornøyd med poretrykksutviklingen.

Omfanget av poretrykksmålinger er trappet kraftig ned og måleintervallene økt etter anleggets avslutning. Situasjonen overvåkes med dette sammen med setningsnivellelementer.

Brønnene var primært ment å støtte opp i driftsfasen, men det er ennå ikke avklart om brønner skal drives permanent ved Parkveien/Inkognitogata. Dette avhenger av setnings- og poretrykksutvikling i området.

#### 8.3.10 Kostnader

For å etablere en vanninfiltrasjonsbrønn fra terreng for opprettholdelse av poretrykk i dyprenner kan man grovt regne med en kostnad på 200 000 kr. For ettersyn én gang per måned med nødvendig skifte av filter osv. kan det grovt regnes en kostnad på 2 500 kr per måned per brønn.

### 8.4 Infiltrasjonsbrønner i løsmasser

Oslo kommune har noe erfaring med infiltrasjonsbrønner i løsmasser. I 1966 ble det installert tre brønner ved St. Olavs plass, ved Oslo helseråds nybygg, som i prinsippet skulle infiltrere vann både gjennom sprekker i fjell og direkte inn i permeable løsmasser over fjell. Etter to års drift oppsto det lokale terrengsetninger rundt den ene brønnen, og det viste seg da at det var tendenser til kraterdannelse i løsmassene langs borstrengene i alle de tre brønnene.

Fem løsmassebrønner ble installert i Studenterlunden nær Rosenkrantz gate i forbindelse med NSB – Oslotunnelen. Vanningangen var svært beskjeden. Det ble registrert kraterdannelse langs borestrengen for to av brønnene.

I 1976 ble det satt ned 15 løsmassebrønner på Frogner i forbindelse med bygging av NSB - Oslotunnelen fra Oslo Sentralbanestasjon til Skøyen. Etter at infiltrasjon hadde pågått et halvt år, ble det konstatert utvasking og erosjon rundt flere av brønnspissene. Disse hullene ble da avstengt, mens resten ble avstengt våren 1977. Infiltrasjonen var ikke tilfredsstillende effektiv, og det så ut til at en del av infiltrert vannmengde fant vei opp langs rørene.

I Sverige har løsmassebrønner, hovedsakelig fra terreng, vært det vanligste. Hovedproblemet har her vært at infiltrasjonskapasiteten har blitt redusert med



tiden, til tross for bruk av kommunale drikkevannskilder som infiltrasjonsvann. Her har det vist seg at de brønnene som klarte de første årene med drift på 70-tallet fremdeles var i drift i 1994. Men også i Sverige har man erfart problemer med kraterdannelse ved brønnene pga. utvasking av løsmasser.

Årsaken til problemene med løsmassebrønner er sammensatt. De fleste brønner i Oslo ble utført ved gruskasting rundt en brønnspeiss satt ned der man forventet permeable masser mellom leire og fjell. Erfaringer fra Oslos dyprenner viser at disse massene egentlig er relativt finkornige glasifluvialt avsatt silt/sandavsetninger. Et felles problem er at vanninngangen i disse glasifluviale avsetningene har vært beskjeden (maksimalt noen få l/min ved overtrykk på 0,5 til 1 bar). Selv om man tidlig innså at overtrykket måtte være beskjeden (helst ikke over 0,5 bar) hvis lekkasje skulle unngås, viste det seg at det ofte ble satt på relativt stort trykk (2-4 bar) under testing av brønnene. Har man først fått en strømningsforbindelse/kanal fra brønnen og opp til terreng i en slik tidlig testfase er skaden allerede skjedd. For å prøve å øke vanninngang og effekt er det imidlertid også i noen tilfeller anvendt større trykk enn hva som er å anbefale under den permanente driftsfasen.

Ved de fleste brønner har foringsrøret benyttet under nedboring også blitt stående som permanent forsegling mot leira over brønnspeiss/gruskasting. Lekkasje ved slike brønner har antagelig også sammenheng med at det under nedboring av foringsrøret har oppstått glipper mellom utsiden av foringsrøret og omkringliggende leire. Denne problemstillingen blir spesielt alvorlig hvis det bores med eksenter krone, men selv ved bruk av innvendig krone vil leira på utsiden av røret lett kunne svekkes. Den blir uansett kratig omrørt og vil danne en svakhetssone inntil leira er rekonsolidert. Det vil si at brønntesting ikke bør skje før det har gått minst 1 uke.

En sikrere utførelse av brønnen kan være å trekke foringsrøret helt opp parallelt med at det injiseres i hulrommet røret etterlater seg. Likevel er det vanskelig å sikre seg helt mot at vannet finner seg uønskede lekkasjeveier opp til terreng.

## **9 ERFARINGER MED VANNGARDIN**

### **9.1 Generelt**

Prinsippet for vanngardin er å øke grunnvannstrykket rundt et luftputekammer eller et lager kunstig. En vanngardin består av en rekke borehull over og noen ganger også langs sidene av luftputekammeret/lageret. Hullene er forbundet med en vannpumpe som holder et konstant trykk i hullene. Dersom trykket i vanngardinen er høyt nok til å danne en trykkgradient mot bergrommet i lekkasjeveiene, vil det ikke forekomme lekkasjer. To typer pumper har blitt brukt; ”triple-plunger” pumper og sentrifugalpumper.

En vanngardin består av en mengde borhull i fjell som settes under et definert vanntrykk. Slik vanninfiltrasjon har i lang tid vært en integrert del av etablering av store fjellhaller for lagring av råolje og raffinerte produkter.

Også når det gjelder bruk av vanngardin var svenskene tidlig ute. I artikkelen "*The performance of a water curtain during ten years of operation*" beskriver Ulf E. Lindblom (1987) erfaringer fra det som oppgis å være det første skandinaviske fjellanlegg for lagring av gass, som var designet med vanngardin.

I Norge finnes eksempler på etablering av vanngardiner rundt olje- og gasslagre og i tillegg i forbindelse med luftputekammer i kraftverk. Goodall og Kjørholt (1989) oppsummerer erfaringer fra vanngardindesign for sju ulike prosjekter. Vanngardinprinsippet brukes ved tre norske vannkraftverk for å hindre luftlekkasjer ut av luftputekamrene. Vanngardin kan også brukes for å hindre produktlekkasjer mellom nærliggende lagerhaller. Filosofien ved denne type lagre er at potensialet i vanngardin skal være så mye større enn maks potensial i kammeret at lekkasje unngås. I de fleste tilfeller er grunnvannstrykket større enn kammertrykket, og vanninfiltrasjon benyttes som et hjelpemiddel til å opprettholde det naturlige grunnvannstrykket. I ett tilfelle, luftputekammer ved Torpa kraftverk, er imidlertid naturlig grunnvannstrykk mindre enn kammertrykket, og man er helt avhengig av et tilleggstrykk fra vanngardin for å oppnå tilfredsstillende tetthet. Erfaringene så langt tyder på at bruk av vanngardin fungerer etter hensikten. Størst usikkerhet er nok likevel knyttet til oppførsel på lang sikt, men det er til nå ikke rapportert om alvorlige driftsforstyrrelser ved noen av anleggene som baserer seg på vanngardiner.

Flere av prosjektene i ovennevnte sammenstilling er nøyere beskrevet i egne artikler. Ulike sider ved Torpa kraftverk er beskrevet av Kjølberg og Kleiven (1992), Kjørholt & Goodall (1989-B) og Kjølberg (1989). Luftputekammer ved Kvilldal er beskrevet av Kjørholt & Goodall, Johansen og Stokkebø (1989).

LPG-lagre på Rafnes og Mongstad er beskrevet av henholdsvis Johansen, Madsen (1989) og Neramoen & Blindheim (1989).

Oljelager på Sture er beskrevet av Larsen (1989).

For syv vanngardiner gjennomgått i Goodall og Kjørholt, 1989, varierte borehullstettheten fra 6 til 157 m borehull per 1000 m<sup>3</sup> lagervolum. Typisk innbyrdes avstand mellom borehullene varierte fra 4 til over 20 m, mens typisk minimumsavstand mellom gardinhull og kammeret varierte fra 7 m til nesten 40 m. Stadig avtagende vannforbruk i vanngardin og vanninnstrømning ble registrert over en periode på flere år ved to LPG-lagre. Verken ved disse eller de andre hydrokarbonlagrene ble det registrert lekkasjer.

Slagboring med diameter fra 50-100 mm er benyttet ved samtlige vanngardiner som ble gjennomgått. Maksimum tilrådelig lengde av vanngardinhullene begrenses av faren for store avvik og av tilgjengelig borutstyr. Typiske maksimumslengder var 70 m, mens lengder på 105 m forekom.

Det er indikasjoner på at Lugeon-verdier basert på målinger i enkelthull gir en øvre grense for beregning av vannforbruk i vanngardinen.

Når det gjelder anleggene Rafnes og ØEF (Sverige) har vannforbruk og vanninnstrømming til kammeret avtatt med tiden. Årsakene er uklare. Teorier har vært at vanngardinhullene blir gjentettet på grunn av bakteriell vekst, eller noen form for mauring. Vanngardinfunksjonen ble ikke registrert svekket. Ved Rafnes var mesteparten av senkningen av vannforbruket unnagjort i løpet av de fire første årene. Det ble også redusert en stadig reduksjon i innstrømming til kammeret. Reduksjonen i innstrømming til kammeret ved ØEF er enda tydeligere enn ved Rafnes.

## 9.2 Luftputekamre

For anleggene Kvilldal, Tafjord og Torpa var lufttapet uakseptabelt fra luftputekamrene, og en benyttet seg av vanninfiltrasjon for å unngå dette. Tabell 1 og Tabell 2 oppsummerer data fra disse anleggene.

*Tabell 1 Vanngarding geometri og hydrogeologiske parametere (Goodall og Kjørholt, 1989)*

Anlegg	Kammer volum (m <sup>3</sup> )	Statisk vanntrykk (m)	Ant. Bor-hull	Samlet lengde vanngardin hull (m)	Spesifikk hullengde (m/1000m <sup>3</sup> )	Avstand vanngardin – hull (m) (min, typisk, max)	Avstand lager – gardin (m) (min, typisk, max)	N (m)	N-K (m)	G-K (m)	Vanngardinstrøm (m/s)
Kvilldal (luft)	100 000	484	47	2550	26	1,10,25	2,10,25	695	76-117	Ca 100	10
Torpa (luft)	12 000	225	36	1880	157	1,5,10	7,7,7	525	- (152-213)	30-70	10

N=naturlig grunnvannsnivå

G=vanngardinpotensial

K=vannpotensial ved kammerheng

*Tabell 2 Luftlekkasje (Kjørholt og Dahlø, 1992)*

Anlegg	Bergart	Permeabilitet (m <sup>2</sup> )	Forhold mellom luftputetrykk og naturlig grunnvannstrykk	Luftlekkasje (Nm <sup>3</sup> /time)	Luftlekkasje (%/dag)
Kvilldal	Migm. gneis	2·10 <sup>-16</sup>	>1,0	240/0*	0,2/0
Tafjord	Båndet gneis	3·10 <sup>-16</sup>	1,8-2,1	150/0*	5/0
Torpa	Metasiltstein	5·10 <sup>-16</sup>	1,7-2,0	400/0*	2,0/0

\* uten/med vanngardin

### 9.2.1 Kvilldal kraftverk

Ved Kvilldal er forholdet mellom porevann og lufttrykk 0,6. Dette førte til uakseptabelt lufttap, men etter at vanngardin ble konstruert og satt i drift ble lufttapet eliminert.

Før vanngardinsystemet ble satt i drift ble det målt en lekkasje på 240 Nm<sup>3</sup>/time. For å redusere dette ble det konstruert et vanngardinsystem med 47 borehull med



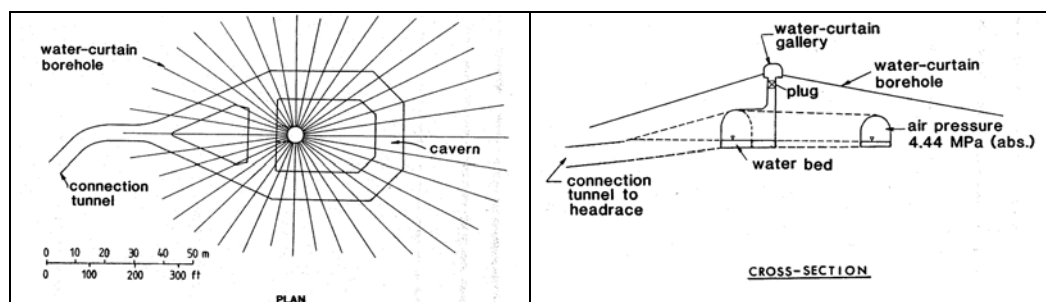
51 mm diameter. Vanntrykket i disse holdes 1 MPa over trykket i luftputekammeret. (Kjørholt og Dahlø, 1992)

### 9.2.2 Tafjord kraftverk

Kompressorene som var installert for å holde lufttrykket oppe i luftputekammeret hadde ikke nok kapasitet som en følge av luftlekkasje fra kammeret, og kammeret var derfor ute av drift fra 1982 til 1990. Injeksjon for å tette berget var ikke tilstrekkelig. Det ble derfor installert en vanngardin i 1990, delvis som et forskningsprosjekt. Det består av 16 borehull med diameter 56 mm, som dekker både hengen og øvre del av veggene. Også her forsvant lekkasjene etter at vanngardinen ble satt i drift. Trykket var 0,3 MPa over trykket i luftputekammeret. (Kjørholt og Dahlø, 1992)

### 9.2.3 Torpa kraftverk

Ved Torpa kraftverk (Dokka-prosjektet) er det bygget et luftputekammer med volum 17 400 m<sup>3</sup> og luftvolum 10-12 000 m<sup>3</sup>. I dette området er overdekningen 225 m og vanntrykket 450 m. For å motvirke lekkasje av luft er det konstruert en vanngardin over kammeret. Vanngardintrykket er 2-5 bar høyere enn trykket i kammeret. Et av hovedkriteriene var at vanngardintrykket måtte være mindre enn minste hovedspenning i berget for å unngå hydraulisk splitting. Det ble derfor gjort en mengde tester. Luftputekammeret er bygget i smultringform, og vanninfiltrasjonshullene er boret fra et kammer over dette, se Figur 31. Fra en sjakt ble det drevet et kammer 10 m over hovedkammeret med diameter 6 m. Herfra ble vanninfiltrasjonshullene boret. Det ble boret 36 borehull med diameter 64 mm. Vanntapsmålinger ble utført i infiltrasjonshullene, og vanntapet var lite. Kammeret er støpt igjen og trykksatt med vann fra et rør gjennom betongpluggen. To pumper mater vannet til infiltrasjonsrørene. Basert på kalkulert permeabilitet i berget ble det estimert et vannforbruk på 350 l/min, men vannforbruket er målt til ca. 40 l/min.



Figur 31 Torpa luftputekammer med vanngardin (Kjørholt, Dahlø og Broch, 1992)

Etter to år i operasjon (1992) indikerte tester at det var ingen luftlekkasje så lenge overtrykket var mer enn 2 bar. Bergarten i området er metaleirstein, som normalt har en lav permeabilitet.

Dette anlegget var særlig spesielt fordi overdekningen i meter over luftputekammeret var bare 50 % av vanntrykket i meter.

Lufttrykket i kammeret var 4,4 MPa, mens vanngardinen ble designet til å ha et vanntrykk på 4,9 MPa, dvs 0,5 MPa mer (Kjølberg og Kleiven, 1992).

### 9.3 LPG- og oljelagere

Vanninfiltrasjon har også blitt benyttet i forbindelse med LPG- og oljelagere i berg. Vanninfiltrasjonssystemet er en integrert og permanent del av lagringsprinsippet. Tabell 3 viser data for 5 slike anlegg (ÖEF ligger i Sverige).

Tabell 3 Vanngardingeometri og hydrogeologiske parametere (Goodall og Kjørholt, 1989)

Anlegg	Kammer- volum (m <sup>3</sup> )	Statisk vann- trykk (m)	Antall borhull	Samlet lengde vannardi- n hull (m)	Spesifikk hulllengde (m/1000m 3)	Avstand vanngardin – hull (m) (min, typisk, max)	Avstand lager – gardin (m) (min, typisk, max)	N (m)	N-K (m)	G-K (m)	Vanngardin- strøm (m/s)	Vannstrøm til kammeret (m <sup>3</sup> /s)
Rafnes (LPG)	100 000	115	34	2100	21	1,8,15	6,22,26	25	44-74	90-121	50	35
ÖEF (LPG)	120 000	131	94	4180	35	3,4,5	14,14,14	256	97-99	83-85	2	2
Sture (olje)	700 000	27-60	230	20 000	29	11,11,11	15,>15,>15	2-35	12-65	25-70	5-11	8
Mongstad (olje)	1 300 000	55-80	140	7800	6	18,>20,70	15,>15,>15	20- 45	40-85	110- 130	76	-
Mongstad (butan propan)	10 000 20 000	73-78	39	3100	103	8,8,16	20,38,54	15- 20	63-68 29-34	138 104	28	-

N=naturlig grunnvannsnivå  
G=vanngardinpotensial  
K=vannpotensial ved kammerheng

På grunn av liten overdekning over oljelagrene er vanngardinene boret fra overflaten. Potensielle problemer er stor løsmasseoverdekning og fare for frysing av vanntilførselssystemet.

#### 9.3.1 Rafnes propanlager

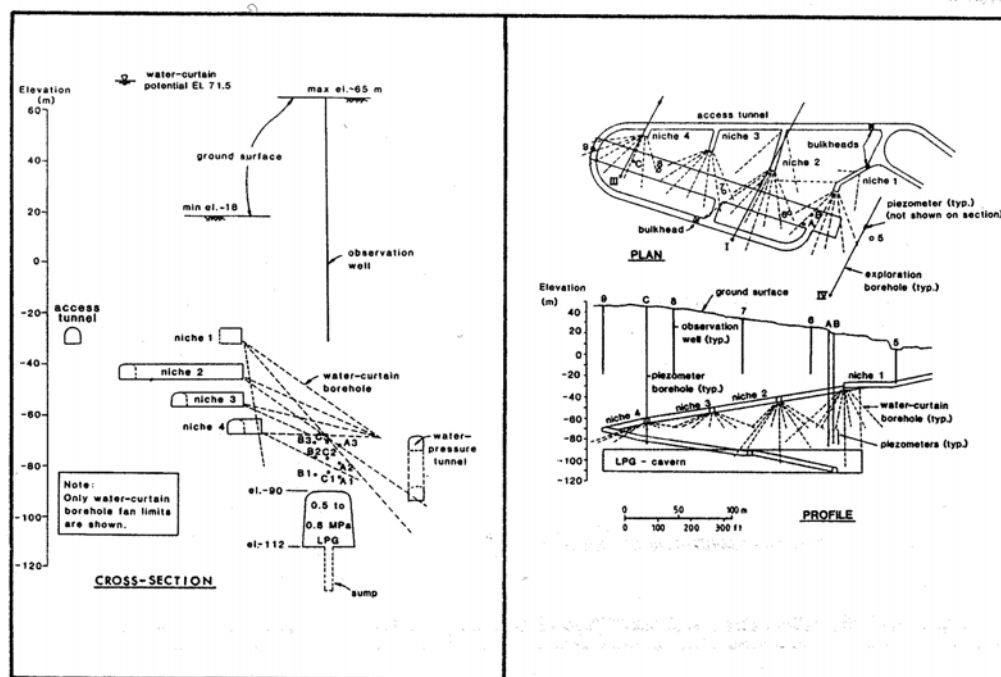
Propanlageret på Rafnes er designet for å romme ca. 100 000 m<sup>3</sup> og tåle trykk på 0,79 MPa. Anlegget ligger i pre-kambriske granittiske bergarter ca 90 m under havnivå, ble drevet mellom 1974 og 1977, og er ikke utstøpt. I tillegg til grunnvannsgradienten ble det installert en vanngardin under drivingen.

Designkriteriet var at den hydrauliske gradienten mot bergrommet skulle være større enn 1. Kravet til ikke utstøpte bergrom var basert på at grunnvannsnivået over bergrommet må være likt eller over nivået som korresponderer med det interne maksimum overtrykket pluss 20 m vanntrykk.

Da adkomsttunnelen ble drevet, ble det registrert en markert senkning av grunnvannsnivået i de allerede installerte observasjonsbrønnene. Det viste seg at injeksjon og vanning fra overflaten ikke var nok. Det ble derfor installert et vanninfiltrasjonssystem fra fire nisjer i adkomsttunnelen, med totalt 36 infiltrasjonshull med diameter 2 1/2". For å overvåke grunnvannstrykket over

anlegget ble det boret fem observasjonsbrønner og tre piezometerhull før og under drivingen. Vanninfiltrasjonen medførte at grunnvannsnivået holdt seg på opprinnelig nivå. Total lengde av borehullene var 2110 m og vanninngangen 450 l/min i 1977. Infiltrasjonstrykket var ca. 0,6-0,7 MPa. Over de første ca. 10 årene var vannlekkasjen inn i anlegget 200-300 l/min. Volumet av vann som ble infiltrert ble redusert fra 450 l/min i 1977 til 300 l/min i 1987. Det meste av denne reduksjonen kom de første 2-3 årene, og mengde infiltrert var omtrent konstant siden 1981. Hovedårsaken til reduksjonen var trolig en tiltettingseffekt i borehullene som følge av urenheter i vannet, som reduserer permeabiliteten rundt borehullene som igjen reduserer effekten av infiltrasjonssystemet. Anlegget er koblet til brannslukningssystemet. Vedlikeholdskostnadene for infiltrasjonssystemet har vært lave. (Johansen og Madsen, 1989).

Figur 32 viser eksempel på bruk av vanngardin i forbindelse med Rafnes LPG-lager.



Figur 32 Rafnes LPG-lager (Goodall og Kjørholt, 1989)

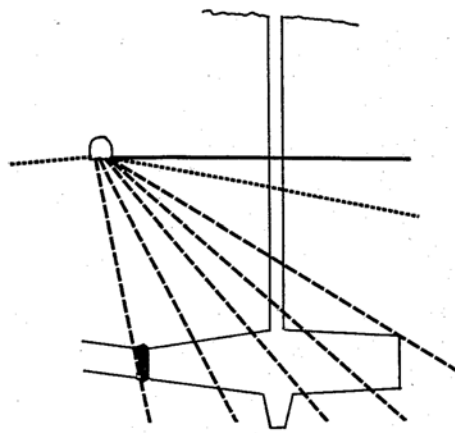
### 9.3.2 Mongstad, lager for LPG

Under oppgraderingen av Mongstad oljeraffineri ble tre lagringshaller for gass bygget. Anlegget var ferdig 1989. Før driving av anlegget ble vanngardin etablert over og mellom hallene for å opprettholde grunnvannsnivået under drift og senere. Anlegget ligger i moderat oppsprukket gneiser.

Designprinsippet var å balansere gasstrykket i hallene med det hydrostatiske trykket fra grunnvannet. På grunn av de forventede problemene med å reetablere poretrykket i en drenert bergmasse, ble det truffet tiltak for å unngå for stor senkning av poretrykket. Først ble det drevet et galleri ved nivå -20m, ca. 40-55 m

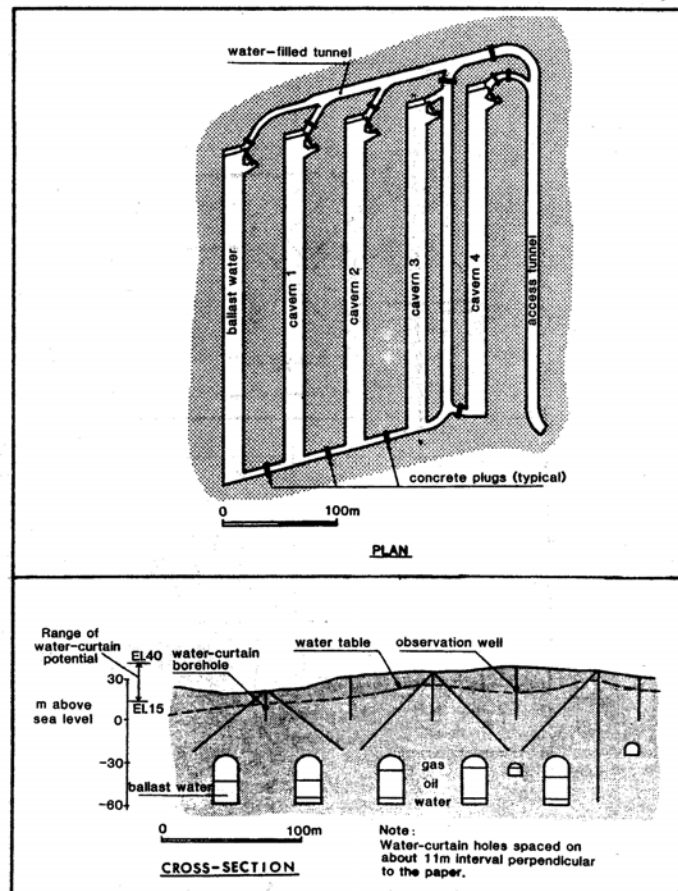
over de planlagte hallene. Herfra ble vanngardinen boret. Vanngardinen ble dannet av tre parallelle horisontale borehull over hver hall, og fem vertikale hull i vifteform ved siden av og mellom hver hall, se Figur 33. Borehullene ble koblet til ferskvannstilførsel. Den totale lengden av infiltrasjonshullene var ca. 2200 m, og det lengste hullet var 105 m langt. Alle hullene ble boret ved topphammerboring. Infiltrasjonen førte til et høyere og mer stabilt grunnvannsnivå i området over anlegget. Mye av det infiltrerte vannet kom ut på overflaten, noe som kan skyldes at den horisontale gardinen lå for nær overflaten i forhold til trykket som ble benyttet.

For oppfølging av grunnvannsnivået ble 12 borehull overvåket 1-3 ganger i uken.



Figur 33 Vanngardin ved Mongstad (Nermoen og Blindheim, 1989)

Figur 34 viser eksempel på bruk av vanngardin i forbindelse med Sture oljelager.



Figur 34 Sture oljelager (Goodall og Kjørholt, 1989)

## 10 OPPSUMMERING OG KONKLUSJONER AV VANNINFILTRASJON FOR OPPRETTHOLDELSE AV PORETRYKK I MARINE AVSETNINGER

### 10.1 Når skal vanninfiltrasjon benyttes?

Vanninfiltrasjon i Oslo-området benyttes for å opprettholde poretrykket i marine avsetninger slik at setninger og skader på bebyggelse ved bygging av tunneler og byggegrøper motvirkes.

Felles for alle vanninfiltrasjonsanlegg som er i drift i dag etter at tunnelen er tatt i bruk, er at ingen har vært planlagt som et permanent tiltak under planlegging av tunnelen. Enkelte anlegg har nå vært i drift i ca 20 år.

En del vanninfiltrasjonsanlegg har opprinnelig vært planlagt før bygging som midlertidig tiltak, inntil god nok tetthet er oppnådd i anlegget. En del av disse vanninfiltrasjonsanleggene har blitt avvirket når tunnelen eller byggegrøpen har blitt ferdigstilt, dvs. at ting har gått etter planen. Andre har glidd over til å bli en permanent løsning.

Noen vanninfiltrasjonsanlegg har ikke vært planlagt før problemer med for store lekkasjer under bygging har aktualisert vanninfiltrasjon som et tiltak. Det gjelder for eksempel de fleste brønner som ble installert og fortsatt er i drift i forbindelse med Romeriksporten.

Kort oppsummert kan det sies om permanente vanninfiltrasjonsanlegg at alle er nødløsninger, fordi man har mislykkes med sitt opprinnelige mål, dvs. å lage en tett nok tunnel. En viktig årsak til at man ikke har lyktes med å lage en tett nok tunnel er at målet, dvs. hva er tett nok, ikke har vært klart nok definert på forhånd. Det har på mange prosjekter vært mangler både når det gjelder omfang av grunnundersøkelser og geotekniske analyser rettet mot konsekvensen av lekkasjer i tunneler. Dermed har man endt opp med diffuse krav under tunneldriften og nødløsninger når ting går galt.

For fremtidig bruk av vanninfiltrasjonsanlegg anbefales det å begrense disse til å inngå i en plan hvor tunnelen eller byggegroppen skal tettes godt nok, og vanninfiltrasjonen kun skal være et midlertidig tiltak i byggeperioden, for eksempel inntil en vanntett betongstøp er på plass. Det betyr at mulige problemområder langs en tunnel eller ved en byggegrop må identifiseres som en del av forundersøkelsene og vanninfiltrasjonsanlegg må prosjekteres i disse områdene på samme nivå som øvrig prosjektering av byggeobjektet.

Det følger av avsnittet ovenfor at bruk av permanente vanninfiltrasjonsanlegg generelt frarådes. Selv en forbilledlig prosjektering av et vanninfiltrasjonsanlegg kan ikke kompensere for at slike løsninger for å unngå skader på bebyggelse bærer preg av ”kunstig åndedrett”. Et kunstig åndedrett som etterlater eieren av byggeobjektet med betydelige krav til oppfølging og kontroll til ”evig tid”.

## 10.2 Effekt av vanninfiltrasjon

Løsmassebrønner har generelt ikke gitt god nok effekt, dvs. de har ofte ikke løftet poretrykkene opp til ønsket nivå. I tillegg er det erfart problemer med driften av løsmassebrønner, med erosjon som det alvorligste problemet.

Det anbefales derfor å la løsmassebrønner hvor man infiltrerer med overtrykk, være et avsluttet kapittel for opprettholdelse av poretrykk i marine sedimenter. Kort sagt: Ikke bruk dem mer! Der forholdene ligger til rette for hydrostatisk betinget vanntilførsel kan løsmasseinfiltrasjon fortsatt være en løsning, men kostnadene vil trolig bli høye.

Brønner boret ned i berggrunnen gir generelt god effekt. Basert på erfaringene med ulike vanninfiltrasjonsanlegg kan det konkluderes med at ved å tilpasse antall brønner, plassering i forhold til problemområdet og vanninngangen vil man oppnå god kontroll med poretrykkene. Effekten av vanninfiltrasjonen på poretrykket er også nokså umiddelbar, slik at man raskt vil se på poretrykksmålerne i området hvor effektiv en brønn er. En god regel kan være heller å etablere flere brønner som hver for seg gir moderate vannmengder under moderate trykk, enn få brønner med store vannmengder og høye trykk.





Det er verd å merke seg at vanninfiltrasjon i berg gir best effekt når utgangspunktet er at det er oppnådd en reduksjon i den hydrauliske konduktiviteten rundt tunnelen. Dvs. at det er viktig å utføre tetting/injeksjon selv i et tilfelle hvor vanntett betongsstøp skal tjene som permanent tetting av tunnelen, og vanninfiltrasjonen kun skal virke i en kortere periode. Spesielt er det viktig med en viss injeksjon i bergmassen i tilfeller der selve infiltrasjonen finner sted nær tunnelen. Ellers kan man risikere ikke å oppnå særlig annet enn å øke vannlekkasjen i tunnelen ved infiltrasjonen.

### 10.3 Plassering av borehull i berg

Poretrykkssenkning og setninger er knyttet til dyprenner med marine sedimenter. For plassering av borehull/brønner i slike områder bør man ta hensyn til følgende:

1. I de dypere deler av dyprennen eller i det skrånende berget på sidene, vil man oftest finne den mest oppsprukne og mest permeable bergmassen. Det betyr at det er fra disse områdene mesteparten av tunnellekkasjen dreneres.
2. Oftest finnes de mer permeable løsmasselag under de tettere leir- og siltavsetningene i de dypere deler av dyprennen.
3. Man ønsker stor sannsynlighet for at borehullet skjærer soner i bergmassen med høy hydraulisk konduktivitet. Det betyr at man søker å bore et skråhull.
4. Siden det er i berget det skal infiltreres vann, er alle boremeter gjennom løsmasser ineffektive boremeter eller kun transportetapper.

Punkt 1 – 3 ovenfor betyr at ved etablering av brønner fra terreng vil man ofte ende opp med å bore langs en skrånende fjelloverflate. Punkt 4 gir som resultat at man i tillegg ender opp med å starte hullet ut mot kanten av dyprennen. Eksempel på dette er Figur 1 på side 7.

Ved boring av hull fra tunnelen, noe som ofte er hensiktsmessig og kostnadsbesparende, er det i prinsippet meget enkelt; man borer hull på skrå ut fra tunnelen under det aktuelle området. En brønn fra tunnelen er rask å etablere, slik at man kan vente til tunnelen er inne i det problematiske området. Ideelt sett bør man bore hullet før det drives inn under dyprennen. Det vil også gi tid til å teste effekten av brønnen før problemet med vannlekkasjer oppstår.

For hullengder ved boring fra terreng gir data fra Romeriksporten for brønner oppsummert i Kapittel 8.3.8 en pekepinn over det aktuelle området, se Tabell 4.

Tabell 4 Oppsummering av hulldata fra brønner ved Romeriksporten (30 brønner)

Beskrivelse	Min.	Middel	Maks.
Lengde foringsrør gjennom løsmasser (m)	0	12	31
Total hullengde (m)	26	67	135
Hullengde i berg (m)	20	55	123
Effektiv infiltrasjonslengde (m) <sup>1)</sup>	12	43	108
Helning (grader)	20	40	58
Pakker-dyp under terreng (m)	6	15	35
Hull-dyp under terreng (m)	15	42	79

1) Med effektiv infiltrasjonslengde menes avstanden mellom pakkeren enden av borehullet.

Ved planlegging av vanninfiltrasjonsanlegg i en dyprenne vil det være behov for mer detaljert kunnskap om geologien enn den mer generelle kunnskapen man etter hvert har fått om disse dyprennene. Det betyr at forundersøkelser er nødvendig som grunnlag for prosjekteringen av vanninfiltrasjonsanlegget som sådant, i tillegg til forundersøkelser rettet spesielt mot løsmassenes setningsegenskaper og bergmassekvaliteten. Disse forundersøkelsene må rettes spesielt mot to forhold:

1. Detaljerte data om bergoverflatens beliggenhet: Man må være sikker på ikke å bore ut i løsmasser eller så nært løsmasser at erosjon kan finne sted. Bergoverflaten må være kjent ikke bare langs bølgen, men også ut til sidene. Seismikk for å få det overordnede bildet, kan være egnet avhengig av forholdene på overflaten (tett bebyggelse, forstyrrende elementer nede i bakken osv.). Fjellkontrollboringer må også til i et antall som gir tilfredsstillende sikkerhet for bergoverflatens beliggenhet. For ikke å lage transportveier for mulig eroderbare masser bør alle borehull nær vanninfiltrasjonsbrønner støpes igjen.
2. Bergmassens permeabilitet. I tillegg til vanntapsmålinger i kjerneborehull som likevel skal utføres for å innhente data om bergmassekvaliteten, er det aktuelt å supplere med hammerboringer hvorpå det utføres pumpetester, eventuelt også vanntapsmålinger, langs borehullet. Dersom hullene viser seg å skjære soner med høy hydraulisk konduktivitet, vil de også kunne inngå i vanninfiltrasjonsanlegget.

#### 10.4 Utførelse av borehull i berg

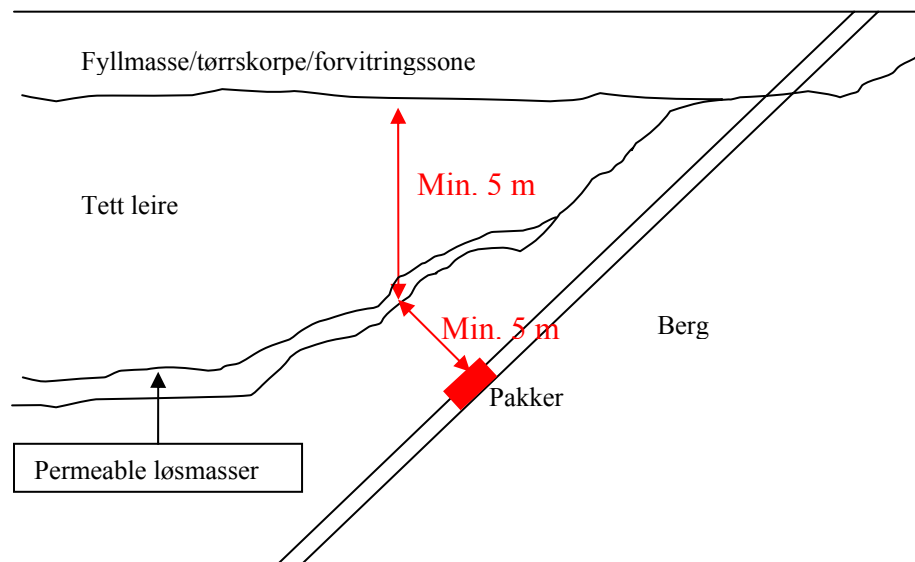
Hull boret fra terreng vil normalt ha helning ca 30° - 50°.

Gjennom eventuelle løsmasser etableres et foringsrør av stål. Dette bores 2-5 m ned i fjell. I fjell brukes vanlig borkrone. Det er i dag vanligst å benytte tradisjonelt brønnboringsutstyr. Kronediameter på 90-100 mm er ansett for egnet dimensjon. Borehullsdimensjonen er imidlertid ikke kritisk når det gjelder infiltrert vannmengde.

Plasseringen av pakkeren bestemmes ut fra boreloggen og data om grunnforholdene på stedet. Ved plassering av pakkeren er det viktig å tenke på



avstanden til potensielt eroderbare løsmasser, spesielt i tilfeller der det er usikkerhet om oppnådd avstand til løsmasser langs ulike deler av borehullet. Figur 35 viser et forslag til minimumskrav til pakkeplassering i et borehull.



Figur 35 Forslag til minimumsavstander ved plassering av pakkeren

Det finnes ulike typer pakkere på markedet, som mekaniske pakkere, ”injeksjonspakkere” osv. Enkelte pakkere skal støpes inn, men det kan være hensiktsmessig å bruke pakkere av en type som kan løsnes og trekkes opp gjennom foringsrøret ved behov for rensing av hullet. Hydrauliske dobbeltpakkere er mye brukt ved Romeriksporten. Sementmørtel eller annet materiale skal fortrinnsvis ikke fylles over pakkere slik at det blir umulig å få den opp igjen. Imidlertid kan det være nødvendig å støpe over pakkere dersom denne har kilt seg fast eller når man ikke klarer å oppnå tilstrekkelig tetthet kun med pakkere.

Et tiltak som bør vurderes for å fremtidige brønner er å tette langs hele foringsrøret, eller i hvert fall de nederste 5 – 6 meterne. Det vil redusere sannsynligheten for at eroderbare masser finner en transportvei opp langs borehullet til nær null. Man bør være spesielt oppmerksom på denne problemstillingen om Odex-boring benyttes. Odex-boring gir åpninger mellom foringsrør og materialet rundt.

Under boring i berget kan høytrykkspyling være et fornuftig tiltak for fremtidige brønner. Høytrykkspyling kan redusere eventuelle problemer med at finstoff som dannes under boringen tetter igjen sprekker i borehullet og dermed vil kunne gjøre potensielle infiltrasjonsveier ut fra borehullet mindre konduktive.

Foringsrør, vanntilkopling og reguleringsenhet bør tilpasses i egnet reguleringskum med kumlokk i terreng/gatenivå.

## 10.5 Vanntilførsel

Vanligvis tas vannet fra ledningsnettet for drikkevann, for i best mulig grad å sikre god vannkvalitet, og for å unngå driftsstopp som følge av manglende tilførsel. Vannkvaliteten kan imidlertid variere fra sted til sted. Stedvis kan det være mye humus og møkk i vannet. Det må sørges for at ledningsfremføringer til reguleringskummene merkes av på kommunens ledningskartverk. Installasjonene skal legges frostfritt eller sikres mot frost på annen måte. Drenasje skal være knyttet til alle kummer slik at det ikke blir stående vann i dem.

Ved infiltrasjon gjennom brønner boret fra tunnelen, kan det være aktuelt å benytte lekkasjevannet fra tunnelen. Det bør da holdes oppsyn med vannkvaliteten, da dårlig vannkvalitet kan føre til tilstopping. Et sedimentasjonsbasseng og filter er helt nødvendig i slike tilfeller.

## 10.6 Testing

For å se om brønnen fungerer etter hensikten må det utføres en testing/utprøving. Om nødvendig testes det i flere nivåer. Testingens hovedformål er å finne forholdet mellom trykk, vanninnngang og respons i poretrykk eller grunnvannstand.

Primært bør man søke å plassere brønnen og pakkeren slik at man oppnår god nok vanninnngang ved bruk av moderat trykk. Dersom testingen viser at man ikke har lykket, kan man søke å øke infiltrasjonskapasitet ved å utføre hydraulisk trykking av brønnen for å åpne eksisterende eller etablere nye sprekker. Det er da viktig å teste på nytt for å kontrollere resultatet. Hydraulisk splitting medfører risiko for å ødelegge brønnen. Denne operasjonen må derfor følge en fastlagt prosedyre, og man må under utførelsen nøyaktig registrere trykk og vanninnngang.

## 10.7 Vanninnngang og trykk

For samtlige brønner fra Romeriksporten oppsummert i Kapittel 8.3.8 er det i alt 2702 registreringer av vanninnngang og trykk. Noe statistikk er oppsummert i Tabell 5.

Tabell 5 *Oppsummering av vanninnngang og trykk fra brønner ved Romeriksporten (2702 registreringer)*

	<b>Middel</b>	Median	Min.	25. persentil	75. persentil	Maks.
Vanninnngang (l/min)	<b>19,7</b>	16,0	0,5	10,0	24,0	85,0
Trykk (bar)	<b>2,4</b>	2,4	0,0	0,8	3,9	7,3

Noter at i trykkregistreringene er det også en del null-registreringer, dvs. at vannsøylens høyde i infiltrasjonsbrønnen er tilstrekkelig for å oppnå ønsket vanninngang.

Forutsatt at man har tatt forhåndsregler for å unngå erosjon som beskrevet tidligere bør man kunne akseptere innfiltrasjonstrykk på inntil ca. 4 bar, men man bør prøve seg frem og øke trykket gradvis. Har man boret et hull fra tunnelen som ligger 10 – 20 m under bergoverflaten er sannsynligheten for erosjon knyttet til bruk av høye trykk og store vanninnganger ikke så stor som ved mer gruntliggende hull, og det er mulig man kan øke trykket ytterligere noe.

## 10.8 Kontroll av trykk, vanninngang og effekt av brønnen

Kontroll av trykk og vanninngang oppnås ved trykkmåler, reguleringsventil og vannmåler i nedgravd kum. Dersom det er flere brønner bør reguleringen av vanntilførsel plasseres i samme kum hvis dette er mulig. Effekten på poretrykket måles med hjelp av at tilstrekkelig antall poretrykksmålere som plasseres nært fjelloverflaten.

Avlesning kan skje manuelt eller automatisk, avhengig av hvor mye reguleringsteknikk og fjernstyring det legges opp til. Begge deler krever gode oppfølgingsrutiner.

Reguleringsanordningen styrer trykk og vannmengder. Regulering kan utføres manuelt eller det kan legges opp til automatisk registrering og fjernavlesning av vannmengder og trykk.

For å kunne fange opp eventuelle endringer i brønnens oppførsel og effekt er det viktig å ha en systematisk kontroll av trykk, vanninngang og poretrykk. I startfasen til en brønn bør/kan kontrollen skje så ofte som daglig. Senere kan kontrollhyppighet være fra hver andre uke til én gang per måned.

## 10.9 Vedlikeholdsrutiner

Det må utarbeides vedlikeholdsrutiner for er infiltrasjonsanlegg. Disse bør inkludere jevnlig feltkontroller med manuell kontroll av registrerte data, og en generell kontroll av at alle deler av systemet er i operativ stand og om utbedring og måleteknisk kalibrering er nødvendig.

Sil spyles/vaskes ren ved hvert ettersyn, og eventuelle spesialfilter (membranfilter) skiftes ved behov. Kontroll hyppighet: Fra hver andre uke til én gang per måned.

## 10.10 Erosjon

Det er to kjente tilfeller av erosjon ved bruk av brønner som er planlagt boret i berggrunnen, på Majorstua (Kapittel 8.3.5) og på Ruseløkka (Kapittel 8.3.10).

Spesielt brønnen på Majorstua ga en meget dramatisk hendelse med 30 m<sup>2</sup> av en kjeller som forsvant plutselig. Det ble fylt 58 m<sup>3</sup> med betong og pukk i selve krateret samt utført injeksjon i løsmassene under krateret.

Det to viktigste tiltakene for å unngå lignende hendelser i fremtiden er:

1. Sørge for god nok avstand mellom brønn og bergoverflaten. Det krever at man utfører nok grunnundersøkelser på forhånd, og ikke tar noen sjanser med å "anta fjellforløpet". Se også Kapittel 10.4.
2. Tette langs foringsrøret. Se også Kapittel 10.4.
3. Begrense driftstiden. Beregninger for brønnen på Majorstua viser at det forsvant minst 52 kg masse per døgn over en periode på 7 år og 4 måneder, men den hadde vært i drift sammenhengende i 11 år. Brønnen på Ruseløkka hadde vært i drift i snaut 8 år da den forårsaket et krater i en kjeller. Om man følger rapportens anbefaling i Kapittel 10.1 om å begrense bruken av vanninfiltrasjon til et midlertidig tiltak, i praksis vil det si fra noen måneder til kanskje noen få år, skal slike driftstider være historie når det gjelder nye anlegg.

Det er også verd og merke seg ut fra disse to hendelsene at oppfølging av trykk og vanninngang ikke nødvendigvis gir beskjed om at noe er på gang. Brønnen på Ruseløkka syntes å oppføres seg fint inntil krateret ble dannet. For brønnen på Majorstua kunne det imidlertid ha vært mulig å fatte mistanke om at ikke alt var som det skulle være ut fra at vanninngangen økte ganske kraftig uten det kunne forklares med at trykket var blitt økt. For øvrig kan det her bemerkes at årvåkenheten i oppfølgingen har en tendens til å svekkes over tid.

## 11 REFERANSER

Andersson, A-C og Berntson, J. (1979)

Kontrollerad grunnvattenbalans genom djupinfiltration – en inventering av djupinfiltrationsprojekt. Chalmers Tekniska Högskola, Geohydrologiska forskningsgruppen. Meddelande nr 26, 269 pp, Göteborg

Andersson, A-C og Carlsson, L., m.fl. (1980)

Djupinfiltrasjon. EN metod att upprätthålla grundvattentrycket i slutna akviferer. Utförande, dift och kontroll. BFR Rapport R166:1980.

Barbo, T.F. og Danielsen, S.W. (1980)

Bacterial impairment of water curtain between oil storage caverns in rock. Proc. of the Int. Conf. on Subsurface Space (Rockstore), Stockholm, s. 245-250. Pergamon Press Ltd. 1980  
ISBN 0-08-026136-1

Goodall, D.C. og Kjørholt, H. (1989)

Erfaringer fra vanngardindesign. Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk / Geoteknikk 1989, Tapir Forlag 1989, ISBN 82-519-1007-2

Jernbaneverket Region Øst (2002)  
v/ Steinar Myrabø og Asbjørn Færgestad  
Miljøovervåkning og tiltak i Østmarka 2001

Johansen, P.M. og Madsen, O.K. (1989)  
The Rafnes propane storage cavern - 12 years of successful operation.  
Storage of Gases in Rock Caverns, Nilsen & Olsen (eds), 1989 Balkema,  
Rotterdam. ISBN 90 6191 896 0

Karlsrud, Kjell (1982)  
Drenasje og setningsproblemer i forbindelse med fjelltunneler i Oslo-området.  
NGI rapport 52652-1, 1. september 1982

Karlsrud, Kjell (1983)  
Drenasje og setningsproblemer i forbindelse med fjelltunneler i Oslo-området.  
NGI publikasjon nr 147

Karlsrud, Kjell (1987)  
Tetthetskriterier i forbindelse med fjellinjetunnelen gjennom Oslo.  
NGI intern rapport 52652-4, november 1987

Karlsrud, Kjell (1988)  
Tetting av bergmasser. Erfaringer fra trafikk-tunneler i Oslo.  
NGI intern rapport 52652-3, 25 juli 1988

Karlsrud, Kjell (1990)  
Tetting av tunneler, bergrom og byggegroper. Tunneler i tettbygde strøk -  
forundersøkelser, funksjonskrav og valg av tettestrategi.  
NGI intern rapport 52652-05, februar 1990

Kjølberg, R.S. (1989)  
Air cushion surge chamber at the Torpa power plant.  
Storage of Gases in Rock Caverns, Nilsen & Olsen (eds), 1989 Balkema,  
Rotterdam. ISBN 90 6191 896 0

Kjølberg, R. S. og Kleiven, R. (1992)  
Design, construction and operational experience at the Torpa air cushion surge  
chamber.  
Hydropower'92, Broch & Lysne (eds), 1992 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410  
054 0

Kjørholt, H. og Goodall, D.C. (1989)  
Instrumentation and research for the Torpa air cushion surge chamber.  
Storage of Gases in Rock Caverns, Nilsen & Olsen (eds), 1989 Balkema,  
Rotterdam. ISBN 90 6191 896 0

Kjørholt, H., Goodall, D.C., Johansen, P.M. og Stokkebø, O. (1989)  
Water curtain performance at the Kvilldal air cushion.

Storage of Gases in Rock Caverns, Nilsen & Olsen (eds), 1989 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 896 0

Kjørholt, H., Dahlø, T.S. og Broch, E. (1992)  
Geotechnical design of air cushion chambers.  
Hydropower '92, Broch og Lysne (eds), 1992 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410 0540

Larsen, Tore M. (1989)  
Grunnvannskontroll, Sture. Erfaringer fra bygging og drift.  
Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk / Geoteknikk 1989, Tapir Forlag 1989.  
ISBN 82-519-1007-2

Lindblom, Ulf E. (1989)  
The performance of a water curtain during 10 years of operation.  
Storage of Gases in Rock Caverns, Nilsen & Olsen (eds), 1989 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 896 0

Miljø- og Samfunnstjenlige tunneler. Rapport nr. 14. Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø. Statusrapport 2001

Morfeltdt, C-O. (1979)  
Varför bygga under marken ? Publikation 68, Hagconsult, Stockholm.

Myrabø, S. og Færgestad, A. (2002)  
Miljøovervåkning og tiltak i Østmarka, 2001.  
Jernbaneverket Region Øst

Nermoen, B. og Blindheim, O.T. (1989)  
Ground Water maintenance and leakage control during construction of unlined rock caverns for pressurized gas storage, Mongstad.  
Storage of Gases in Rock Caverns, Nilsen & Olsen (eds), 1989 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 896 0

NGI rapport 85614-12  
Statens vegvesen v/veisjefen i Oslo. E18 gjennom Oslo – Fjellinjen. Statusrapport.  
Feltarbeid for vanninfiltrasjonsbrønner. Datert 9 juni 1987

NGI rapport 971056-1 Romeriksporten. Forprosjekt: Modellering av vanninjeksjon. Datert 9 februar 1998.

NGI rapport 526521-1 Tetting av tunneler i tettbygde strøk. Sammenstilling av erfaringsdata. Datert 21 desember 1998.

NSB Gardermobanen AS (1999)  
Romeriksporten. Permanent infiltrasjon av vann i løsmasseområder. Prinsipper for etablering, driftsovervåkning og vedlikehold. Mai 1999

Olofson, B. og Palmgren, S. (1994)



SveBoFo Rapport 13  
Djupinfiltration för grundvattennivåkontroll  
Stockholm 1994  
ISSN 1104-1773

Oslo kommune Geoteknisk kontor  
Fjellinjen. Poretrykk – setninger. Statusrapporter.  
R-2145

Oslo kommune Geoteknisk kontor  
Fjellinjen. Testing av vanninfiltrasjonsbrønner.  
R-2145-2 og 3 datert 01.03.88 og 10.04.88

Oslo kommune, Vann- og avløpsverket. Saksbeh. J. Grøndal  
Avløpstunnel Majorstua-Torhov R-1329 22. januar 1992  
Del 10: Suhms gate – Slemdalsveien  
Grunnundersøkelser, boring og testing av vanninfiltrasjonsbrønner

Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten. Saksbeh. J. Grøndal  
Nationaltheateret stasjon. Utvidelse.  
R-2932 datert 08.11.01  
Del 8: Sluttrapport over poretrykk og vanninfiltrasjon

Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten. Saksbeh. J. Grøndal  
Måned rapport: Romeriksporten. Poretrykk og vanninfiltrasjon.  
R-2882 datert 14. mars 2001, 8. november 2002, 13. januar 2002, 7. mars 2002

Statens vegvesen Oslo  
Data fra Tåsuntunnelen v/Bøyeie, A. E.



# Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



<b>Oppdragsgiver/Client</b> Prosjektet Miljø- og Samfunnstjenlige tunneler	<b>Dokument nr/Document No.</b> 20001042-4
<b>Kontraksreferanse/ Contract reference</b>	<b>Dato/Date</b> 5 juni 2003
<b>Dokumenttittel/Document title</b> Vanninfiltrasjon – erfaringer og anbefalinger	<b>Distribusjon/Distribution</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Fri/Unlimited</b> <input type="checkbox"/> <b>Begrenset/Limited</b> <input type="checkbox"/> <b>Ingen/None</b>
<b>Prosjektleder/Project Manager</b> Vidar Kveldsvik <b>Utarbeidet av/Prepared by</b> Anette Wold Magnussen og Vidar Kveldsvik	
<b>Emneord/Keywords</b> Vanninfiltrasjon, water injection, water infiltration	
<b>Land, fylke/Country, County</b>  <b>Kommune/Municipality</b>  <b>Sted/Location</b>  <b>Kartblad/Map</b>  <b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>  <b>Feltnavn/Field name</b>  <b>Sted/Location</b>  <b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>

Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001							
Kon- trollert av/ Reviewed by	Kontrolltype/ Type of review	Dokument/Document		Revisjon 1/Revision 1		Revisjon 2/Revision 2	
		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed	
		Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.
KK	Helhetsvurdering/ General Evaluation *						
	Språk/Style						
	Teknisk/Technical - Skjønn/Intelligence - Total/Extensive - Tverrfaglig/ Interdisciplinary						
	Utforming/Layout						
VK	Slutt/Final						
	Kopiering/Copy quality						
* Gjennomlesning av hele rapporten og skjønnsmessig vurdering av innhold og presentasjonsform/ On the basis of an overall evaluation of the report, its technical content and form of presentation							
Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release			Dato/Date			Sign.	